



# ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ДЛЯ МЕДИКОВ

II

1987

IX A-45537

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра геофизики

---

# ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ДЛЯ МЕДИКОВ

II

Составитель Х.ТЕРАЛЬ

---

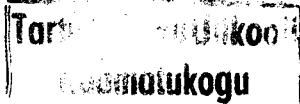
ТАРТУ 1987

Утверждено на заседании совета физико-химического  
факультета 15 апреля 1987 г.

Сборник включает в себя описание 10 лабораторных работ по электричеству и элементам электроники. Эти работы были разработаны заново или модернизированы на основе прежних работ преподавателями кафедры геофизики В.Карком, Т.Мюллер-сепом, Х.Тераль и М.Таммеоргом с учетом требований, предъявляемых программой по физике для студентов - медиков.

Составителем сборника внесены некоторые дополнения к ряду описаний и упорядочено использование обозначений.

KUSTUTATUD



## ИЗУЧЕНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Введение

#### 1. Характеристики переменного тока.

Индукционные генераторы, установленные на электростанциях, вырабатывают э.д.с., которая со временем изменяется по синусоидальному закону  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \frac{2\pi}{T} t$ . По такому же закону будет изменяться сила тока в сети и напряжение между любыми двумя ее точками:

$$J = J_m \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \text{и} \quad U = U_m \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (I)$$

Здесь  $\mathcal{E}$ ,  $J$ ,  $U$  — мгновенные,  $\mathcal{E}_m$ ,  $J_m$ ,  $U_m$  — максимальные значения или амплитуды э.д.с., силы тока и напряжения соответственно,  $T$  — период изменения мгновенных значений.

Переменное напряжение сети используют для питания различного рода нагревателей, источников света, технических устройств, разнообразной аппаратуры. Электрическая цепь, к которой в каждом конкретном случае прикладывается переменное напряжение, может состоять из одного или нескольких элементов. Эти элементы могут иметь в основном активное сопротивление, а могут обладать сильно выраженными индуктивными или емкостными свойствами. Задачей данной лабораторной работы является изучение своеобразных процессов, протекающих в цепях переменного тока, составленных из разных по свойствам элементов. При рассмотрении явлений предполагается, что используемые токи квазистационарны.

Переменный ток считают квазистационарным, если время установления одинакового по всей цепи тока намного меньше периода его колебаний. Электрические возмущения распрост-

раняются в цепи со скоростью, равной скорости света. Время установления тока  $\tau = \frac{\ell}{c}$ , где  $\ell$  - длина цепи. Для технического синусоидального тока с частотой 50 Гц ( $\frac{1}{f} = T = 0,02$  с) квазистационарность тока будет соблюдаться для цепей длиной в несколько десятков километров (пусть  $\ell = 30$  км, тогда  $\tau = \frac{30 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} \text{ с} = 10^{-4} \text{ с} \ll T = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ ). Для цепей длиной порядка 3 м квазистационарность тока сохранится до частот  $10^6$  Гц (если  $\ell = 3$  м, то  $\tau = \frac{3}{3 \cdot 10^8} \text{ с} = 10^{-8} \text{ с} \ll T = 10^{-6} \text{ с}$ ).

В случае квазистационарных токов для участка цепи отношение  $U/I$  сохраняет постоянное значение. Отношение  $\frac{U}{I} = Z$  называют полным сопротивлением цепи переменному току. Для квазистационарных токов справедлив закон Ома  $I = \frac{U}{Z}$ .

Пока мы имеем дело только с одной переменной величиной, то период и амплитуда полностью характеризуют процесс, так как начальный момент отсчета времени можно выбрать произвольно. Но когда приходится сопоставлять две или несколько переменных величин, то нужно учитывать тот факт, что они могут достигать максимального значения в разные моменты времени. На рис. 1 две кривые изображают два переменных тока с одинаковой амплитудой и частотой, но смещенных по оси времени на отрезок, равный одной четверти периода. В таких случаях говорят, что два тока (или другие периодически изменяющиеся величины) сдвинуты друг относительно друга по фазе или, что между ними существует разность фаз. Так как кривая 2 проходит максимальное значение позже, чем кривая 1, то говорят, что она отстает по фазе от первой кривой, или, иначе, кривая 1 опережает по фазе кривую 2.

Таким образом, в общем случае, когда имеют дело с несколькими синусоидальными величинами, каждую из них характеризуют периодом, амплитудой и фазой. Период определяет частоту (число колебаний в единицу времени)  $f = \frac{1}{T}$  и круговую (циклическую) частоту  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . Величину  $\frac{2\pi}{T} t = 2\pi f t = \omega t$ , стоящую под знаком функции  $\sin$ , называют фазой. Разность фаз двух переменных величин находят путем вычитания фазы одного колебания из фазы другого колебания в тот же момент времени.

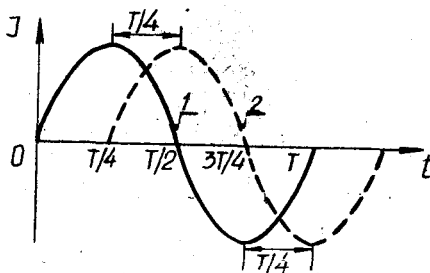


Рис. 1. Кривые двух смещенных по фазе токов.

В технике и лабораторном эксперименте переменный ток описывают средне-квадратичными значениями силы тока и напряжения, называемыми эффективными (действующими), которые характеризуют тепловое действие переменного тока.

Среднее значение функции  $J^2 = J_m^2 \sin^2 \omega t$  в пределах изменения аргумента  $t$  от 0 до  $T$  (за период) по определению среднего значения функции будет

$$\begin{aligned} \overline{J^2} &= \frac{J_m^2}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{J_m^2}{2T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = \\ &= \frac{J_m^2}{2T} \left[ t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right]_0^T = \frac{J_m^2}{2}. \end{aligned}$$

Таким образом, эффективное значение силы тока

$$J_{\text{эфф}} = \sqrt{\overline{J^2}} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} = 0,707 J_m.$$

Аналогично для эффективного значения напряжения можно получить

$$U_{\text{эфф}} = \sqrt{\overline{U^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m.$$

В эффективных значениях силы тока или напряжения градуируются шкалы большинства электроизмерительных приборов.

## 2. Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

Пусть цепь составлена из источника переменного напряжения ( $U = U_m \sin \omega t$ ) и нагрузки в виде металлического проводника (рис. 2 а). Будем считать, что индуктивность и емкость этой цепи пренебрежимо малы. Пусть будет мало и внутреннее сопротивление источника. В этом случае сопротивление цепи переменному току описывает препятствующее действие, оказываемое на колебательное движение зарядов в материале проводника со стороны не участвующих в этом движении частиц, совершающих хаотическое тепловое движение. Значение  $R$  сопротивления этого проводника зависит от длины и поперечного сечения, от состава и строения материала проводника, а также от температуры. Сопротивление  $R$  называют активным или омическим сопротивлением цепи. Силу тока можно вычислить, используя закон Ома

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

Колебания силы тока происходят в фазе с изменением напряжения (рис. 2 б). Амплитуда тока

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

Аналогичное соотношение может быть написано для эффективных значений

$$I_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{эфф}}}{R}.$$

Связь между силой и напряжением переменного тока очень наглядно можно отразить с помощью векторной диаграммы (рис. 2 в). Амплитуды  $I_m$  и  $U_m$  изображают векторами, вращающимися с частотой  $\omega$ . Поскольку в рассматриваемом случае сила тока и напряжение изменяются в фазе, то вектора направлены одинаково. В начальный момент времени они расположены горизонтально. Это направление выберем за "ось тока". Проекции векторов  $\vec{I}_m$  и  $\vec{U}_m$  на ось тока определяют мгновенные значения силы тока и напряжения.

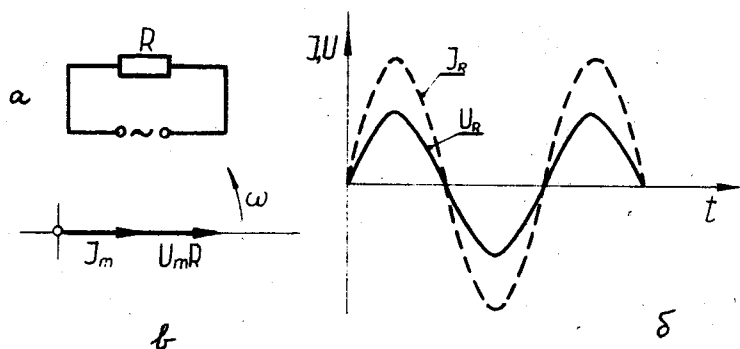


Рис. 2. Графики и диаграмма силы тока и напряжения для цепи переменного тока с активным сопротивлением.

### 3. Индуктивность в цепи переменного тока.

Пренебрежем малым активным сопротивлением и емкостью катушки  $L$ , включенной в цепь переменного тока в виде нагрузки (рис. 3 а). При изменении силы тока в катушке индуцируется э.д.с. самоиндукции  $\mathcal{E}_L = -L \frac{dJ}{dt}$ . Напряжение переменного тока на катушке в любой момент времени должно уравниваться, э.д.с. самоиндукции, т.е. быть численно равным  $\mathcal{E}_L$  и противоположным ей по знаку. Но величина  $\mathcal{E}_L$  пропорциональна скорости изменения силы тока и поэтому достигает максимума в те моменты времени, когда сила тока, быстро изменяясь, проходит через нулевое значение, и минимума, когда сила тока почти не изменяется, проходя через экстремальное значение. Следовательно, напряжение на катушке проходит через все фазы на  $1/4$  периода раньше, чем сила тока. Из условия

$$u_m \sin \omega t = L \frac{dJ}{dt}$$



МОЖНО ЗАПИСАТЬ

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{U_{mL}}{L} \sin \omega t$$

и далее

$$dJ = \frac{U_{mL}}{L} \sin \omega t dt.$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$J = -\frac{U_{mL}}{\omega L} \cos \omega t = -J_m \cos \omega t = J_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Итак, ток в цепи с катушкой отстает по фазе от напряжения на угол  $\pi/2$  (рис. 3 б).

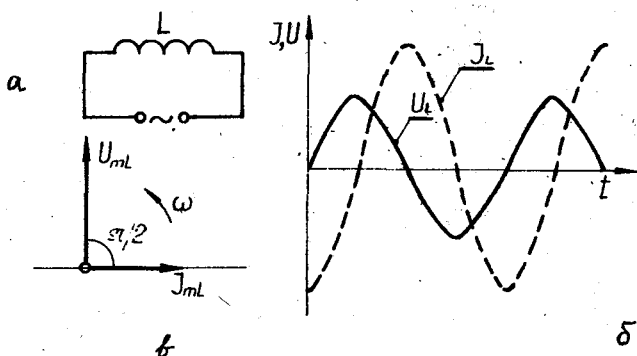


Рис. 3. Графики и диаграмма силы тока и напряжения для цепи с индуктивным сопротивлением.

Амплитуды тока и напряжения связаны между собой соотношением

$$J_m = \frac{U_{mL}}{\omega L} = \frac{U_{mL}}{X_L}.$$

В этой формуле величину

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

называют индуктивным сопротивлением цепи переменного тока.

Индуктивное сопротивление цепи зависит от индуктивности катушки и частоты изменения силы тока.

Диаграмма показана на рис. 3в. Вектор амплитуды напряжения  $U_{mL} = I_m \omega L$  повернут против направления вращения часовой стрелки на угол  $\pi/2$  относительно вектора силы тока.

#### 4. Ёмкость в цепи переменного тока.

Рассмотрим цепь, состоящую из источника переменного тока и конденсатора ёмкостью  $C$  (рис. 4 а).

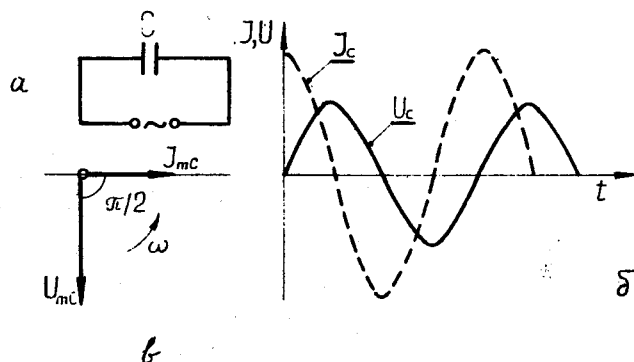


Рис. 4. Графики и диаграмма силы тока и напряжения для цепи с ёмкостным сопротивлением.

Пренебрежем малыми активным и индуктивным сопротивлениями.

При каждом изменении направления тока конденсатор перезаряжается и чем больше его ёмкость, тем больший

электрический заряд накапливается на нем при каждом его зарядении, а, следовательно, при каждом изменении направления тока, проходит по цепи. Влияние конденсатора на силу протекающего в цепи тока описывают с использованием понятия емкостного сопротивления.

Емкостное сопротивление цепи, тем меньше, чем больше емкость конденсатора и частота переменного тока, т.е.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3)$$

Напряжение  $U_c$  на конденсаторе следует за изменением напряжения источника практически мгновенно, т.е. достигает максимума одновременно с  $U$  и обращается в нуль при  $U = 0$ .

Мгновенные значения напряжения  $U_c$  должны быть равны мгновенным значениям напряжения источника  $U$

$$U_c = U_m \sin \omega t = q/C.$$

Здесь  $q$  - заряд на пластинах конденсатора,  $C$  - его емкость.

Из этого равенства

$$q = C U_m \sin \omega t.$$

Сила тока

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{dq}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \frac{U_m}{X_c} \cos \omega t = \\
 &= I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)
 \end{aligned}$$

опережает напряжение по фазе на угол  $\pi/2$ .

Для участка цепи с емкостным сопротивлением

$$I_m = \frac{U_m C}{X_c} \quad \text{и} \quad I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}} C}{X_c}.$$

Графики силы тока и напряжения для этого случая приведены на рис. 4 б, а векторная диаграмма на рис. 4 в. Сила тока проходит нулевое значение в тот момент, когда конденса-

тор заряжен до амплитудного значения напряжения.

## 5. Импеданс цепи переменного тока.

Пусть к источнику с напряжением  $U = U_m \sin \omega t$  на зажимах в качестве нагрузки подключены последовательно резистор, катушка и конденсатор (рис. 5 а). Сила тока в цепи изменяется по закону  $I = I_m \sin \omega t$ . Падения напряжения  $U_R$ ,  $U_L$  и  $U_C$  определяются выражениями

$$U_R = I_m R \sin \omega t,$$

$$U_L = I_m \omega L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

$$U_C = I_m \frac{1}{\omega C} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Сумма напряжений на отдельных участках равна приложенному внешнему напряжению  $U = U_R + U_L + U_C$ .

На рис. 5б изображена векторная диаграмма для этого случая.

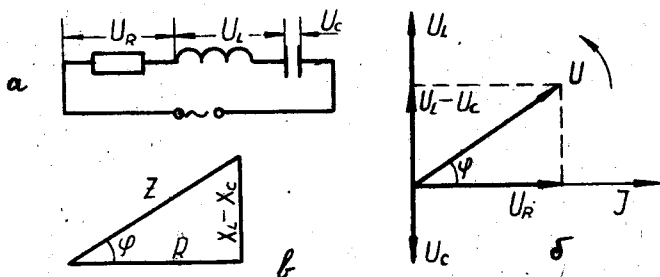


Рис. 5. Векторная диаграмма для цепи, содержащей активный и реактивный компоненты сопротивления.

Напряжение на резисторе изменяется в фазе с током, поэтому вектора  $U_{mR}$  и  $I_m$  направлены одинаково. Напряжение на катушке опережает ток на угол  $\pi/2$ , напряжение на конденсаторе отстает от тока на угол  $\pi/2$ . Вектора  $U_{mL}$  и  $U_{mC}$  имеют противоположное направление. Путем вычитания этих векторов получают вектор разности амплитуд  $U_{mL} - U_{mC}$ . На основании диаграммы для амплитуды внешнего напряжения можно записать

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2} = J_m \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = J_m Z.$$

Величину

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (4)$$

называют полным сопротивлением или импедансом цепи с последовательно соединенными резистором, катушкой и конденсатором.

Амплитуды и эффективные значения тока и напряжения связаны формулами

$$J_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad \text{и} \quad J_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{эфф}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}.$$

Сдвиг фазы  $\varphi$  (см. рис. 5 б) между током и напряжением можно определить из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{mL} - U_{mC}}{U_{mR}} = \frac{J_m \omega L - J_m / \omega C}{J_m R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (5)$$

В зависимости от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями сила тока или отстает ( $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ ) или опережает ( $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ ) напряжение. Когда  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , то  $\varphi = 0$ , т.е. сила тока и напряжение изменяются в фазе.

Разность индуктивного и емкостного сопротивлений  $X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  образует реактивное сопротивление цепи. Реактивный и активный компоненты импеданса могут быть найдены из треугольника сопротивлений (рис. 5в), который строят, уменьшив каждую сторону треугольника напряжений (рис. 5б) в  $J_m$  раз.

Путем аналогичного рассмотрения цепи из параллельно включенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений можно получить следующее соотношение

$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\frac{1}{\omega L} - \omega C)^2} \quad (6)$$

## 6. Мощность

Мгновенная мощность переменного тока в цепи

$$P = I \cdot U = I_m U_m \sin(\omega t - \varphi) \sin \omega t = \\ = I_m U_m \cos \varphi \sin^2 \omega t - \frac{I_m U_m}{2} \sin \varphi \sin 2\omega t.$$

Средняя мощность переменного тока за период (активная мощность), равна работе, совершаемой за период, отнесенной к периоду

$$\overline{P} = \frac{1}{T} \int_0^T I U dt = \frac{I_m U_m}{2} \cos \varphi = I_{\text{эфф}} U_{\text{эфф}} \cos \varphi, \quad (7)$$

т.е. определяется эффективными значениями тока и напряжения и коэффициентом мощности  $\cos \varphi$ .

В случае чисто активного сопротивления нет сдвига фаз между током и напряжением:  $\cos \varphi = 1$ , мощность  $P = I_{\text{эфф}} U_{\text{эфф}}$

При сдвиге фаз между током и напряжением, равным  $\pi/2$ , т.е. когда в цепь включены только емкостное или только индуктивное сопротивление, мощность как видно из графиков тока и напряжения для этих случаев (рис. 3 б и 4 б) в течение  $\frac{1}{4} T$ , когда направления тока и напряжения одинаковы, положительна, в следующие  $\frac{1}{4} T$ , когда эти направления противоположны — отрицательна. Иначе говоря, энергия, запасаемая в цепи в виде энергии электрического поля в конденсаторе или энергии магнитного поля катушки за  $\frac{1}{4} T$ , возвращается в последующие  $\frac{1}{4} T$  обратно в источник тока. В результате не происходит расхода мощности в цепи. Отсюда и название сопротивлений — на сопротивлении  $R$  происходит необратимая потеря энергии,  $R$  — активное сопротивление; на реактивном компоненте расход мощности отсутствует, разность  $X = X_L - X_C$  — реактивное сопротивление.

Обычно, же в цепи переменного тока имеются все виды сопротивлений, значение  $\cos \varphi$  достигает наибольшего значения, равного 1, при условии  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ .

## 7. Резонанс

Вернемся к цепи с последовательно включенными  $R, L, C$ . Импеданс такой цепи  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ . Реактивный компонент сопротивления при условии  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  обращается в нуль. Это происходит при частоте

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (8)$$

называемой резонансной частотой. Полное сопротивление цепи минимально и равно активному сопротивлению:  $Z = R$ .

Максимальной будет сила тока для данного приложенного напряжения. Падения напряжения на катушке и конденсаторе будут равны по амплитуде, но изменяться в противофазе. Такое явление называют резонансом напряжений.

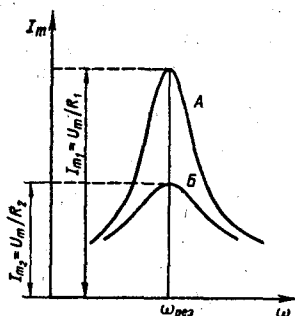


Рис. 6. Графики изменения силы тока в цепи с последовательно подключенными реостатом, катушкой и конденсатором.

Значения резонансного напряжения можно вычислить:

$$U_{mLрез} = U_{mCрез} = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m. \quad (9)$$

Если  $\sqrt{\frac{L}{C}} > R$ , то напряжения на катушке и конденсаторе превосходят по амплитуде приложенное к цепи напряжение. На рис. 6 показан характер изменения силы тока вблизи

резонансной частоты. Чем меньше активное сопротивление цепи  $R$ , тем острее резонанс (в случае кривых на рис. 6  $R_2 > R_1$ ).

Резонанс имеет место и в цепи переменного тока из параллельно включенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений (рис. 7 а).

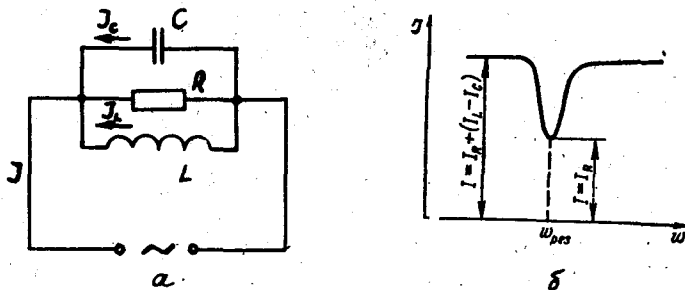


Рис. 7. График изменения амплитуды силы тока в цепи с параллельным включением резистора, катушки и конденсатора.

Обратимся к формуле (6) полного сопротивления этой цепи. Величина  $\frac{1}{\omega L} - \omega C$  обращается в нуль при такой же частоте, как в случае последовательной схемы. При этой частоте равны между собой по величине амплитуды (эффективные значения) тока в катушке и конденсаторе  $I_{mL} = I_{mC}$ , но колебания тока происходит в противофазе. Сила общего тока при резонансе будет минимальной  $I_m = I_{mR}$ . В разветвленной же части цепи токи  $I_L$  и  $I_C$  образуют единый ток, замыкающийся по контуру индуктивности и емкости и не выходящий во внешнюю цепь. Резонанс в цепи с параллельными элементами называют резонансом токов. Характер изменения общего тока показан на рис. 7 б.



## А. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Задание

Определить импеданс, индуктивность и емкость цепи.

### Принадлежности

Разделительный трансформатор, реостат, стенды с катушками и конденсаторами, амперметры, вольтметры, частотомер, провода.

### Ход работы

Исследуемые в этой работе цепи подключаются к сети переменного тока с эффективным значением напряжения 220 В и частотой 50 Гц через разделительный трансформатор. Существование только индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками трансформатора делает эти цепи независимыми от сети (менее опасными для работы). Перед сборкой схемы следует всякий раз убедиться в том, что трансформатор отключен от сети (вилка отсоединена от розетки).

#### 1. Определение индуктивности.

Соберите электрическую цепь переменного тока согласно схеме на рис. 8. На корпусе блока с катушками записаны активные сопротивления  $R$  трех различных отведений катушки, можете использовать любой из вариантов. Движок реостата  $\gamma$ , используемого для изменения силы тока в цепи, установите, так чтобы сопротивление цепи было максимальным.

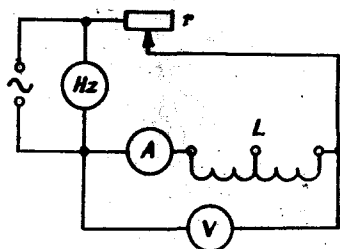


Рис. 8. Схема для определения индуктивности катушки.

На реостате указано допустимое значение тока через него. Не превышайте его при проведении измерений!

Индуктивные сопротивления используемых катушек на частоте 50 Гц невелики, поэтому достаточно использовать вольтметр с пределами 7,5 В, 15 В, 30 В, 75 В. Предел амперметра выберите, учитывая допустимый ток через реостат.

Получив разрешение у преподавателя, включите напряжение. Регулируя силу тока в допустимых пределах, подберите предел вольтметра, так чтобы точность измерений была наивысшей.

Запишите в таблицу I три разные значения силы тока и соответствующие напряжения по крайней мере для двух частей катушки. Вычислите значения

$$Z = \frac{U_{\text{эфф}}}{I_{\text{эфф}}}, \quad X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad L = \frac{X_L}{2\pi f},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}.$$

Таблица I

Отведе- ние, R	$U_{\text{эфф}}$ (В)	$I_{\text{эфф}}$ (А)	$f$ (Гц)	$Z$ (Ом)	$X_L$ (Ом)	$L$ (Гн)	$\operatorname{tg} \varphi$	$\varphi$
...	...							
...	...							

## 2. Определение емкости.

Соберите цепь согласно рис. 9.

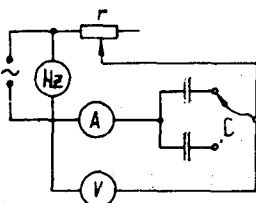


Рис. 9. Схема для определения емкости конденсатора.

Используйте вольтметр с пределом до 300 В. По отношению выбора силы тока в цепи требования такие же, как в предыдущей части работы. Получив разрешение преподавателя, зарегистрируйте также три разные показания амперметра и вольтметра для каждого используемого конденсатора.

Данные измерений и расчетов занесите в табл. 2. В этом случае, можно считать, что

$$Z = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}} = X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Таблица 2

Отведе- ние	$U_{эфф} (В)$	$I_{эфф} (А)$	$f (Гц)$	$X_C (Ом)$	$C (Ф)$
...	...				
...	...				

## Б. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ ОТ ЧАСТОТЫ. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ.

### Задание

Изучить зависимость емкостного и индуктивного сопротивлений от частоты, проверить выполнение закона Ома для цепи переменного тока, ознакомиться с явлением резонанса напряжений.

### Принадлежности

Стенд с катушками и конденсаторами, звуковой генератор ЗГ-102, реостат, универсальный цифровой прибор В7-35, ламповый вольтметр, провода.

### Ход работы

#### І. Исследование зависимости индуктивного сопротивления от частоты. Определение индуктивности катушки.

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 8. Измеряя силу тока в цепи и падение напряжения на катушке при различных частотах, можно вычислить импеданс катушки  $Z$ , ее индуктивное сопротивление  $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ , индуктивность  $L = \frac{X_L}{\omega L}$  и угол сдвига фаз  $\varphi$  между силой тока и напряжением. Активное сопротивление  $R$  катушки известно (записано на стенде для каждой части катушки).

В качестве источника синусоидального напряжения регулируемой частоты в данной работе используется звуковой генератор, который позволяет получить напряжение на выходе до 10 В в диапазоне частот 20 - 20·10<sup>3</sup> Гц.

Для регулирования силы тока в цепи используется реостат

2. Стенд содержит катушку индуктивности с тремя отведениями  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и два конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ .

Для измерения силы тока используется универсальный цифровой прибор В7-35, который рассчитан на измерение напряжения и силы как постоянного так и переменного тока, а также активного сопротивления.

Собирая цепь по рис. 8, включите прибор В7-35 в цепь последовательно, используя входные гнезда "ж" и "ВХОД" на правой боковой панели прибора;

- переключатель рода работы на лицевой панели слева поставьте в положение " $\sim$ " - измерение сигналов переменного тока;

- переключатель рода работы на лицевой панели справа установите в положение " $\mu A - mA$ " - измерение токов;

- прибор В7-35 питается от сети переменного тока напряжением 220 В, клавиша "СЕТЬ" расположена на задней панели прибора. На прогревание прибора нужно 5 минут. При включении питания загорается цифровое индикаторное табло. Если сила тока в цепи отсутствует, показание табло - 000;

- прибор осуществляет автоматический выбор предела измерений, показание считывают с табло, единицы измерения " $\mu A$ " или " $mA$ " указываются автоматически справа от табло;

- прибор индицирует перегрузку - мигает показание 000 на табло. При индикации перегрузки следует немедленно отключить сигнал и закоротить вход прибора. Максимальная измеряемая сила тока в диапазоне частот 20 Гц ... 20 кГц составляет 1000 мА.

Измерение падения напряжения на интересующем участке цепи произведите ламповым вольтметром ЛВ-9 или ВК7-9, используя подходящий предел шкалы. Гнезда для подачи напряжения находятся на лицевой панели прибора. Для прогревания достаточно 5 минут. Приборы питаются от сети 220 В. После прогревания установите стрелку прибора на нулевое деление ручкой "Установка НУЛЯ".

Собрав схему, покажите ее преподавателю и с его разрешения включите приборы на прогревание. Убедившись в готовности приборов к работе, включите напряжение порядка 6 - 8 В (показание по шкале вольтметра звукового генератора).

ра). Изменяя частоту этого напряжения в пределах 100 - 5000 Гц, измерьте силу тока в цепи падение напряжение на катушке. Результаты измерений занесите в таблицу I (8 - 10 значений частоты).

Таблица 3

$f$ (Гц)	$U_{эфф}$ $U$ (В)	$I_{эфф}$ $I$ (А)	$Z$ (Ом)	$X_L$ (Ом)	$L$ (Гн)	$tg \varphi$	$\varphi$
100							
⋮							
5000							

Активное сопротивление катушки  $R = \dots$

Количество используемых отведений задает преподаватель.

Вычислите все величины содержащиеся в таблице и постройте график зависимости  $X_L = y(f)$ .

## 2. Изучение зависимости емкостного сопротивления от частоты. Определение емкости катушки.

В схеме предыдущего пункта, замените катушку на конденсатор (см. рис. 9). Измерьте силу тока в цепи и падение напряжения на конденсаторе в диапазоне частот 100 - 20000 Гц. Рекомендуемые значения частоты: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000, 15000, 20000. Результаты измерений занесите в таблицу 4.

Таблица 4

$f$ (Гц)	$U_{эфф}$ (В)	$I_{эфф}$ (А)	$X_C$ (Ом)	$C$ (Ф)
100				
⋮				
20000				

Вычислите и занесите в табл. 4 значения  $Z = X_C = \frac{U_{згф}}{I_z}$  и  $C = \frac{1}{2\pi f X_C}$ . Постройте график зависимости  $X_C = y(f)$ .

### 3. Проверка закона Ома.

Включите в цепь катушку с вычисленным значением индуктивности  $L$  последовательно с конденсатором, для которого рассчитали емкость  $C$ . Для измерения силы тока в цепи используйте по-прежнему прибор В7-35, а ламповый вольтметр для измерения падения напряжения на последовательно соединенных  $L$  и  $C$ . Изменяя силу тока в цепи с помощью реостата  $\gamma$ , измерьте три разные силы тока и соответствующие падения напряжения при одной и той же выбранной частоте (порядка 1000 Гц).

Данные измерений занесите в табл. 5. Вычислите импеданс  $Z_{изм} = \frac{U_{згф}}{I_{згф}}$  и сравните со значением, полученным по формуле  $Z_{вкл} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ , в которой используйте известные значения  $L$  и  $C$ .

Таблица 5

N	$U_{згф}$ (В)	$I_{згф}$ (А)	$Z_{изм}$ (Ом)	$Z_{вкл}$ (Ом)	$\pm \varphi$	$\varphi$
1						
2						
3						

### 4. Исследование резонанса напряжений.

По известным значениям  $L$  и  $C$  вычислите резонансную частоту  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

Изменяя частоту (возле резонанса) переменного напряжения, прикладываемого к схеме с последовательно включенными  $L$  и  $C$ , проследите за изменением силы тока.

Проверьте, совпадает ли расчетное значение резонансной частоты с экспериментальным. Результаты измерений занесите в таблицу 6.

Таблица 6

$f$ (Гц)	
$I_{эфф}$ (А)	

Достаточно взять 5 – 6 различных значений частоты, меньших и больших резонансного значения.

Постройте график зависимости  $I_{эфф} = y(f)$ .

Количество исследованных комбинаций  $L$  и  $C$  задает преподаватель.

Проанализируйте результаты опытов и погрешность измерений.

#### Литература

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики. I. М., Высш. школа, 1978, с. 140–147.
2. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики. М., 1982, с. 255–264.



## ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ИНДУКТИВНЫМ ДАТЧИКОМ

### Задание

Ознакомиться с принципом работы индуктивного датчика механического перемещения.

### Принадлежности

Катушка индуктивности с перемещаемым сердечником, микрометрическое устройство, генератор сигналов низкочастотный, электронный вольтметр.

### Введение

При измерении неэлектрических величин (температуры, давления, механических перемещений и т.д.) часто используются электрические и электронные измерительные приборы, так как они обладают высокой чувствительностью, малой инерционностью и позволяют производить измерения на расстоянии. Измеряемые неэлектрические величины преобразуются в электрические при помощи датчиков.

Вообще, датчик — это устройство съема информации, реагирующее на воздействие измеряемой величины. Датчик преобразует первичный сигнал (измеряемую величину) в удобный для передачи и измерения вторичный сигнал, в большинстве случаев в электрический. Часто датчики делят на генераторные и параметрические. Генераторные датчики под воздействием измеряемого сигнала генерируют напряжение или ток (например, пьезоэлектрические, термоэлектрические и т.д.). В параметрических датчиках под воздействием измеряемого сигнала изменяется какой-либо его параметр (омическое сопротивление

ление, электрическая емкость, индуктивность).

Обозначим первичный (входной) сигнал через  $x$ , а сигнал с выхода датчика через  $y$ . Функцию преобразования  $y = f(x)$  входного сигнала в выходной, записанную аналитически или изображенную в виде графика, называют характеристикой датчика.

В практике удобно использовать датчики с линейной характеристикой  $y = kx$ .

Величину  $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ , показывающую в какой мере выходной сигнал реагирует на изменения входного сигнала, называют чувствительностью датчиков.

Так как в большинстве случаев электрический сигнал датчика очень слаб, его усиливают с помощью усилителя. Блок-схема подобного устройства преобразования сигнала на рис. I.

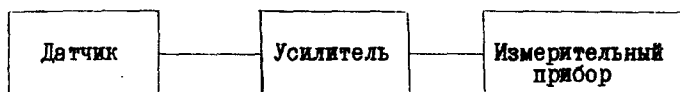


Рис. I. Блок-схема.

Различные датчики применяются широко и в биологической и медицинской практике при измерении различных характеризующих состояние организма и его органов неэлектрических величин. Конструкция этих датчиков очень различна.

Целью данной лабораторной работы является ознакомление с устройством индуктивного датчика механического перемещения и его градуирование.

#### Индуктивный датчик

Простейший индуктивный датчик состоит из катушки и подвижного ферромагнитного сердечника в ней. Сердечник, на который воздействует перемещающийся объект, при своем движении изменяет индуктивность катушки. Изменяется и ее индуктивное сопротивление  $X_L = 2\pi fL$ , если катушка включена в электрическую цепь, питаемую переменным током, а также падение напряжения на катушке. Если известна функция преобразования  $s = f(u)$ , то, измеряя напряжение  $u$  на катушке, можно на-

йти перемещение  $S$ .

Чтобы определить характеристику индуктивного датчика (проградировать его), входной сигнал должен быть измерен с возможно высокой точностью. В нашем опыте для измерения перемещения сердечника 1 (рис. 2) в катушке 2 используется микрометрический винт 3,двигающий сердечник справа налево. Перемещение сердечника слева направо осуществляется при помощи пружины 4. При отсчете микрометра 75 мм, сердечник выдвинут из катушки на максимальное расстояние. Этот отсчет принят за нулевой.

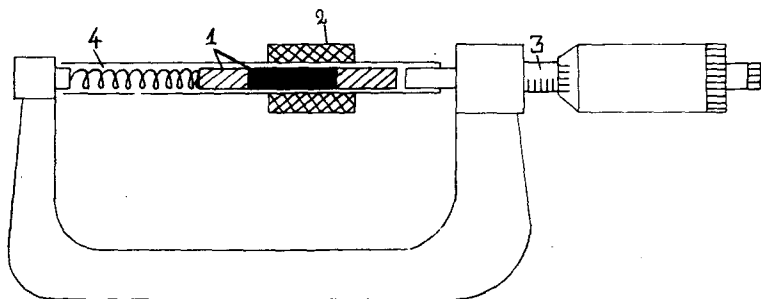


Рис. 2. Устройство для измерения перемещения сердечника.

Катушка соединена последовательно с резистором  $R$  и они подключены к генератору сигналов низкой частоты (рис. 3). Падение напряжения на катушке (выходной сигнал) измеряется электронным вольтметром.

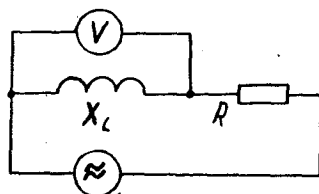


Рис. 3. Электрическая схема датчика.

### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь согласно рис. 3.
2. На вольтметре установите подходящий предел измерений (100 мВ, 300 мВ, 1 В). Слишком большие напряжения (токи) вызывают нагревание проволоки катушки.
3. Регулятор выходного напряжения генератора установите в нулевое (крайнее левое) положение. Частоту выходного сигнала можно выбрать произвольно в пределах 8000...20 000 Гц.
4. Включите приборы в сеть для прогрева (5 минут).
5. Установите на микрометре отсчет 90 мм и вращением регулятора выходного напряжения подберите напряжение, так чтобы стрелка электронного вольтметра отклонилась до максимального показания (на всю шкалу). Этот отсчет будет соответствовать максимальному значению перемещения (15 мм).
6. Перемещая сердечник до деления 75 мм, запишите через каждый миллиметр показания  $U_1$  вольтметра в таблицу.
7. Повторите измерения, перемещая сердечник в обратном направлении (до деления 90) и записывая в таблицу значения  $U_2$ .

Таблица

Перемещение $s$ (мм)	Напряжение $U$ (В)		
	$U_1$	$U_2$	$\bar{U}$
0			
1			
2			
⋮			
⋮			
15			

8. По полученным средним значениям  $\bar{U}$  напряжения постройте график градуирования датчика  $s = f(U)$ .

## 9. Проанализируйте возможные погрешности датчика.

### Контрольные вопросы

1. Можно ли описанным датчиком измерять давление?
2. Предложите вариант емкостного датчика для измерения механических перемещений.
3. Почему сердечник индуктивного датчика должен быть из ферромагнитного материала?
4. Можно ли питать цепь индуктивного датчика постоянным током?
5. Какие неэлектрические величины измеряют наиболее часто в медицинской практике?
6. От каких величин зависит индуктивность катушки?
7. Как определить неизвестную исходную величину по известному выходному сигналу, имея характеристику датчика в виде графика? в виде функции?

### Литература

1. В.Д. Жуковский. Медицинские электронные системы. М., 1976, с. 29-64.
2. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов. М., "Высшая школа", 1982, с. 463-465.

## ИЗУЧЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЖИВОЙ ТКАНИ

### Задание

Изучить зависимость импеданса, емкости и сдвига фаз между током и напряжением для листка растения от частоты ( в случае определенной эквивалентной схемы). Построить векторную диаграмму напряжений для разных частот.

### Принадлежности

Генератор переменного напряжения, осциллограф, листок или стебель растения.

### Введение

1. Для понимания физического смысла данной работы необходимо освоить заранее следующие понятия: переменный ток, сдвиги фаз между током и напряжением в цепи переменного тока, диаграммы тока и напряжения, импеданс (для чего следует прочитать соответствующие темы по [1] и [2]).

2. Опыты показывают, что в случае прохождения переменного тока через живые ткани, полное сопротивление ткани переменному току - импеданс зависит от частоты приложенного напряжения (рис. 1).

Живая ткань не обладает заметной индуктивностью и ее импеданс состоит только из активного сопротивления (равному сопротивлению ткани для постоянного тока) и емкостного сопротивления.

3. Проводимость ткани можно описывать, пользуясь эквивалентными схемами. Для этого следует взять конденсаторы и резисторы, емкости и сопротивления которых известны для некоторой определенной частоты и соединить их, так чтобы суммарный импеданс был равен импедансу живой ткани при этой частоте.

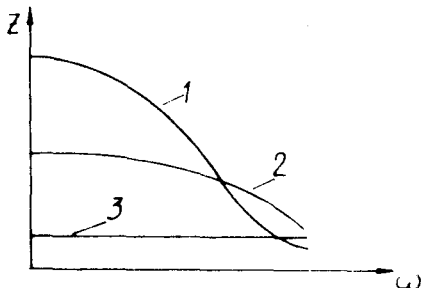


Рис. I. Зависимость импеданса  $Z$  от круговой частоты  $\omega$ .  
1 - для живой ткани, 2 - отмирающей ткани, 3 - мертвой ткани.

Иногда возможно составить такую эквивалентную схему, в которой резисторы и конденсаторы имеют постоянные значения сопротивления и емкости для некоторого интервала частоты.

4. Для объяснения проводимости живой ткани существует несколько теоретических моделей. Рассмотрим одну из них.

Ткани состоят из клеток, омываемых межклеточной тканевой жидкостью. Цитоплазма клетки отделена от межклеточной среды мембраной. **Внутренние составные части клетки** также окружены мембраной. Тканевая жидкость и цитоплазма - электролиты. Мембраны обладают селективной проводимостью, т.е. из ионов, входящих в состав цитоплазмы и тканевой жидкости, хорошо проникают через мембраны ионы только некоторых элементов, для ионов же иных элементов сопротивление велико.

Если приложить к живой ткани постоянное напряжение, то анионы и катионы в электролите станут перемещаться. Движению ионов препятствует селективная пропускаемость мембран. Может создаться такая ситуация, что по обе стороны от мембраны образуются совокупности зарядов противоположного знака. Такая система воздействует на ток как конденсатор. Явление носит название электрохимической поляризации. Электрохимическая поляризация носит объемный характер, она действует в пределах всей ткани и в результате ткань будет обладать поляризационной емкостью.

Поляризационная емкость в живой ткани возникает также за счет смещения связанных зарядов - под воздействием элект-

трического поля полярные молекулы будут поворачиваться, а связанные ионы и электроны смещаться в поле. Поляризационная емкость зависит от силы тока и времени, в течение которого ток воздействует на ткань.

Воздействие электрохимической поляризации и смещения зарядов на силу тока, проходящего через ткань, можно описать как действие некоторого конденсатора, емкость которого равна поляризационной емкости ткани.

Опыты показывают, что наряду с появлением поляризационной емкости, приложение постоянного напряжения к ткани обеспечивает и протекание постоянного тока в ней. Ток проводит в основном тканевая жидкость (электролит). Влияние проводящей составной части ткани на силу тока может быть описано как действие некоторого резистора в цепи.

Таким образом, проводимость ткани относительно постоянного тока можно описать, используя эквивалентную схему с параллельно включенными резисторами и конденсатором (см. рис. 2 а). На основании этой же схемы можно описать проводимость ткани для переменного тока.

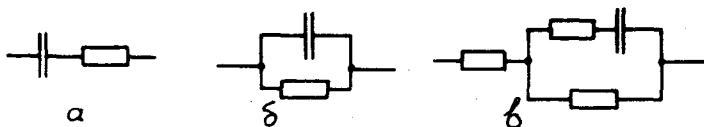


Рис. 2. Примеры эквивалентных схем для ткани.

5. Предположим, что активное сопротивление ткани не зависит от частоты. Следовательно, для объяснения изменения импеданса ткани (рис. 1) следует исследовать зависимость емкостного сопротивления от частоты. Известно, что при увеличении частоты переменного тока, емкостное сопротивление обычного конденсатора уменьшается ( $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ). Однако, емкостное сопротивление живой ткани с увеличением частоты уменьшается медленнее, поскольку с увеличением частоты уменьшается и поляризационная емкость. Приведем более подробное объяснение.

Если частота изменения тока увеличивается, то уменьшается интервал времени (полупериод), в течение которого



ионы движутся в одном направлении. При очень больших частотах (1000 МГц и более) полярные молекулы также не успевают за полупериод изменить ориентации. Следовательно, поляризованная емкость будет меньше.

6. Возникает сдвиг фаз между током и напряжением, величина которого зависит от значений емкости, сопротивления и частоты.

7. Изучение импеданса находит широкое применение в медицине и биологии. Например, в зависимости от интенсивности работы сердца, изменяется кровенаполнение, следовательно, и импеданс тканей. Диагностический метод, основанный на регистрации изменения импеданса с изменением сердечной деятельности, называют реографией или импеданс - плетизмографией. С помощью этого метода исследуют головной мозг (реоэнцефалография), сердце (реокардиография), конечности, легкие, печень и т.д. В реографии обычно используются переменные токи с частотой 20 - 30 кГц.

Для оценки жизнеспособности и функциональной активности тканей и органов используют отношение импедансов для низкой (10 кГц) и высокой (1 МГц) частот. Это отношение характеризует интенсивность обмена веществ.

8. Ознакомимся с теоретическими предпосылками методики измерений. Схема опыта приведена на рис. 3.

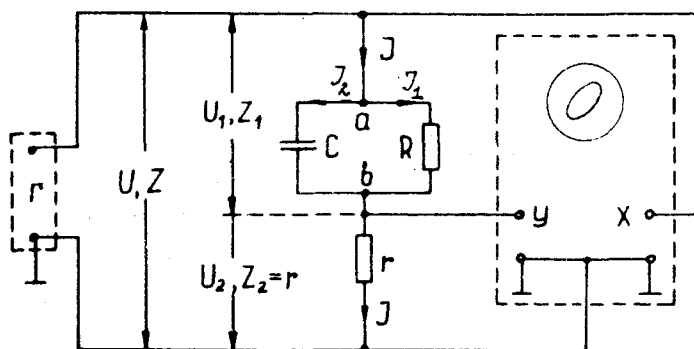


Рис. 3. Схема опыта.

Точкам а и б на рис. 3 соответствуют электроды в виде иголок, которые втыкаются в стебель или лист растения. Лист представлен на рис. 3 как параллельно соединенные резистор  $R$  и конденсатор  $C$ .

Последовательно с листом включен дополнительный резистор  $z$  (значение сопротивления указано на резисторе).

Частоту изменения напряжения  $u = u_m \sin \omega t$ , приложенного к листу и резистору  $z$ , можно изменять (напряжение  $u$  снимается со звукового генератора). Это же напряжение подается на  $x$ -вход осциллографа; на  $y$ -вход осциллографа подается напряжение с дополнительного резистора  $z$ .

Проанализируем связь между силами тока, напряжениями и импедансами в схеме опыта 3.

При входе на листок ток  $I$  раздваивается, через конденсатор  $C$  проходит ток  $I_c$ , который опережает на угол  $\pi/2$  ток  $I_1$ , протекающий через резистор  $R$ . Амплитуда  $I_m$  тока  $I$  определяется векторной суммой амплитуд  $I_{m1}$  и  $I_{m2}$  (рис. 4).

Сила тока  $I_1$  изменяется в фазе с напряжением  $u_1$ , их можно изображать векторами, имеющими одинаковое направление.

Сила тока  $I$  изменяется в одной фазе с напряжением  $u_2$  на резисторе  $z$ , следовательно, вектора  $u_m$  и  $u_{m2}$  имеют одинаковое направление.

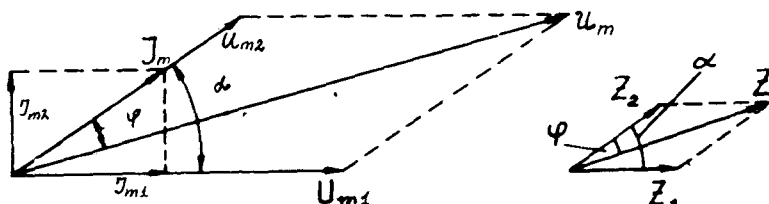


Рис. 4. Сложение сил токов, напряжений и импедансов для схемы рис. 3.

Напряжение  $u_n$  равно векторной сумме напряжений  $u_{m1}$  и  $u_{m2}$ . Согласно рис. 4 разность фаз между силой тока  $I$  и напряжениями  $u$  и  $u_1$  равна соответственно углам  $\varphi$  и  $\alpha$ .

В течение опыта амплитуду напряжения  $u$  поддерживают постоянной, но изменяют частоту изменения напряжения.  $C$

изменением частоты диаграмма токов и напряжений будет изменяться, поскольку изменяются емкостное сопротивление конденсатора, значения импедансов  $Z_1$  и  $Z_2$ , амплитуды токов  $I_m$ ,  $I_{m1}$  и  $I_{m2}$ , разности фаз  $\varphi$  и  $\alpha$ .

Поскольку на х- и у-входы осциллографа поданы напряжения с одинаковой частотой, но отличающиеся по фазе, то на экране возникает эллипс (рис. 5).

Параметры эллипса следующим образом связаны с амплитудными значениями напряжений:

$$L_x = 2U_m \gamma_x, \quad L_y = 2U_m \gamma_y. \quad (1)$$

$\gamma_x$  и  $\gamma_y$  - чувствительности входов осциллографа (см/В).  
Согласно закону Ома для цепи переменного тока

$$U_m = I_m Z \quad U_{m2} = I_m Z_2 \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что

$$Z = \frac{L_x S_x z}{L_y S_y} = \frac{2U_m z}{L_y S_y}. \quad (3)$$

В формуле (3):  $S_x = \frac{1}{\gamma_x}$ ,  $S_y = \frac{1}{\gamma_y}$  (В/см).

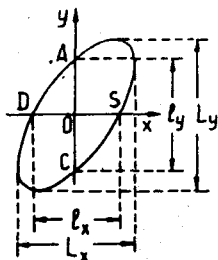


Рис. 5. Определение сдвига фаз по параметрам эллипса.

Сдвиг фаз  $\varphi$  между напряжениями  $U$  и  $U_2$  (см. рис.4) можно определить по формуле

$$\sin \varphi = \frac{l_y}{L_y}. \quad (4)$$

Смысл параметров  $L_y$  и  $L_x$  ясен из рассмотрения рис. 5.

## Ход работы

### 1. Подготовка к проведению измерений.

Амплитуда напряжения  $U = U_m \sin \omega t$ , подаваемого на схему опыта, должна быть примерно 0,5...1В. Для ее измерения следует использовать калиброванный  $y$ -вход осциллографа. Обратные чувствительности  $S_y$  применяемого в работе осциллографа приведены на лицевой панели. Эти цифры справедливы в том случае, если ручка плавного регулирования чувствительности выведена до щелчка. Оцените предварительно, какое значение  $S_y$  установить, чтобы под воздействием выбранного входного напряжения отклонение электронного луча составило  $\sim 2/3$  размера экрана по вертикали. Включите генератор и осциллограф на прогревание. После 5-минутного прогревания установите электронный луч на центр экрана осциллографа (отключите генератор развертки). Подайте напряжение ( $f \sim 1 \text{ кГц}$ ) с выхода генератора на  $y$ -вход осциллографа. На экране должен появиться светящийся вертикальный отрезок. Подберите подходящее напряжение. Запишите или запомните показание вольтметра генератора, которое соответствует выбранному вами точному значению напряжения

$$U_m = \frac{1}{2} L_y S_y. \quad (5)$$

При всех последующих измерениях значение  $U_m$  должно оставаться постоянным, за этим надо следить по вольтметру генератора.

### 2. Проверка частотной характеристики $y$ - и $x$ -входов осциллографа.

Импеданс и другие величины в данной работе измеряются в широкой области частот. На результатах измерений может сказаться зависимость чувствительностей входов осциллографа от частоты. Подключая постоянное по амплитуде напряжение  $U = U_m \sin \omega t$  на  $y$ - и  $x$ -входы, измерьте длины вертикального и горизонтального штрихов соответственно для частот, указанных ниже в таблице I.

Оцените, в какой мере не сохранение значений  $S_y$  и  $S_x$  скажется на результатах работы.

Таблица I

$f(\text{Гц})$	20	40	60	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$
$L_y(\text{мм})$								
$L_x(\text{мм})$								

### 3. Определение сдвига фаз $\varphi$ напряжений $U$ и $U_x$ .

Игольчатые электроды воткните в стебель или лист растения (на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга), на входы осциллографа подайте **напряжения** согласно рис. 3. На экране должен возникнуть эллипс. Чувствительность у-входа подберите, так чтобы размер эллипса по у-оси был возможно большим (используйте только ступенчатую регулировку чувствительности!). Поместите центр эллипса в начало координат сетки экрана осциллографа. Измерьте значения параметров  $L_y$  и  $L_x$  эллипса для трех частот (200, 2000, 20000 Гц). Для измерения  $L_x$  отключите напряжение от х-входа. На основании формулы (4) вычислите сдвиг фаз  $\varphi$ . Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$f(\text{Гц})$	$L_y(\text{мм})$	$L_x(\text{мм})$	$\sin \varphi$	$\varphi$
200				
2000				
20000				

#### 4. Определение зависимости импеданса $Z$ от частоты.

Сняв напряжение с х-входа (на экране только вертикальный штрих) измерьте параметр  $L_y$  для большой области частот. Чувствительность у-входа должна быть выбрана, так чтобы значение  $L_y$  для каждой частоты было по-возможности большим. Значения  $Z$  рассчитайте по формуле (3). Значения  $U_m$  и  $\tau$  не изменяются в течение опыта и их произведение входит в формулу в виде постоянного сомножителя.

Измерения следует произвести при частотах 20, 30, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10000, 15000, 20000, 30000, 40000 и 60000 Гц.

#### 5. Определение значения $R$ эквивалентной схемы ткани.

Постройте график зависимости  $Z = y_1(f)$  в полулогарифмическом масштабе. При частоте  $f$  равной нулю емкостное сопротивление конденсатора будет бесконечно большим и  $Z = R + \tau$  (см. рис. 3). Следовательно, если кривую  $Z = y_1(f)$  экстраполировать к нулевой частоте, можно найти значение  $R$ . Проведите это на своем графике.

Строго говоря, функция  $Z = y_1(f)$  описывает зависимость импеданса последовательно включенных листка растения и дополнительного сопротивления  $\tau$  от частоты. На основании вычислений при данных условиях опыта можно показать, что импеданс  $Z_1 = y(f)$  листка растения в пределах 1 - 3 % совпадает с зависимостью  $Z = y_1(f)$ . Разность между значениями  $Z$  и  $Z_1$  можно вычислить по формуле

$$Z - Z_1 = \sqrt{\frac{2R\tau}{1 + (R\omega C)^2} + \tau^2}. \quad (7)$$

#### 6. Определение зависимости емкости $C$ от частоты.

Анализ схемы опыта на рис. 3 показывает, что

$$\omega C^2 = \frac{1 + 2\frac{\tau}{R}}{Z^2 - \tau^2} - \frac{1}{R^2}, \quad (8)$$

где  $\omega$  - круговая частота переменного тока ( $\omega = 2\pi f$ ) и

$C$  – емкость конденсатора эквивалентной схемы ткани. Величины  $z$ ,  $I + 2 \frac{z}{R}$  и  $\frac{1}{R^2}$  – постоянные опыта. На основании формулы (8) вычислите значения  $C$  и постройте график функции  $C = y_2(f)$  в полулוגарифмическом масштабе.

Емкость  $C$  вычислите для значений  $z \leq 0,9R$ .

7. Расчет сдвига фаз  $\alpha$  между величинами  $I$  и  $U_1$ .

Из теоретического анализа следует

$$\operatorname{tg} \alpha = -R\omega C. \quad (9)$$

На основании формулы (9) вычислите значения  $\alpha$  и постройте график функции  $\alpha = y_3(f)$  в полулוגарифмическом масштабе.

Результаты измерений и вычислений, произведенных в пунктах 4 – 7, занесите в таблицу 3.

Графики  $z = y_1(f)$ ,  $C = y_2(f)$  и  $\alpha = y_3(f)$  следует построить на одном листе. Горизонтальная ось у всех зависимостей одна, на ней должны быть отложены значения  $\lg f$ . На вертикальной оси укажите масштаб единиц I Ом, I Ф и "градусы угла".

Таблица 3

Постоянные опыта:									
$z = \dots \text{Ом}; \quad U_m = \dots \text{В}; \quad K = 2U_m z = \dots \text{В}\cdot\text{Ом}$									
$z^2 = \dots \text{Ом}^2; \quad R = \dots \text{Ом}; \quad I + 2 \frac{z}{R} = \dots; \quad \frac{1}{R^2} = \dots \text{Ом}^{-2}$									
$f$	$S_y$	$L_y$	$Z = \frac{K}{S_y L_y}$	$(\omega C)^2$	$\omega C$	$\omega$	$C$	$-\operatorname{tg} \alpha$	$\alpha$
$\Gamma_4$	В/см	см	$\text{Ом}$	$\text{Ом}^{-2}$	$\text{Ом}^{-1}$	$1/\text{с}$	Ф		
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20									
30									
⋮									
60000									

8. Векторные диаграммы амплитудных значений  $U_m$ ,  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  для частот переменного тока 200, 2000, 20000 Гц.

Значения углов  $\alpha$  и  $\varphi$ , которые определяют направления векторов  $U_m$ ,  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ , возьмите из второй и третьей таблицы. Амплитудное значение напряжения  $U_m$  известно (см. рис. 4). Изобразите вектор  $U_m$  в подходящем масштабе на листке миллиметровой бумаги. Далее разложите вектор  $U_m$  графически на компоненты  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ . Масштаб для амплитудного значения напряжения  $U_m$  известен, таким образом можно по рисунку найти амплитудные значения напряжений  $U_{m1}$  и  $U_{m2}$ . Вычисленные значения занесите в таблицу 4.

Таблица 4

$f$ (Гц)	$\alpha$	$\varphi$	$U_m$ (В)	$U_{m1}$ (В)	$U_{m2}$ (В)
$2 \cdot 10^2$					
$2 \cdot 10^3$					
$2 \cdot 10^4$					

Вопросы

1. Приведите определения следующих физических величин: мгновенное значение тока (напряжения), амплитудное и эффективное значения, частота, круговая частота, фаза и т.д.
2. Объясните смысл векторных диаграмм токов и напряжений а) при последовательном и параллельном соединении конденсатора и резистора, б) для схемы данного опыта.
3. Поясните использование закона Ома в цепи переменного тока.
4. Что означает поляризационная емкость и от чего она зависит?
5. Проанализируйте возможные погрешности измерения в этом опыте.



## Литература

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики. I. М., "Высшая школа", 1978, с. II5-II22 и с. I40-I47.
2. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов. М., "Высшая школа", 1982, с. 255-265.

## ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Задание

Ознакомиться со свойствами полупроводникового диода, с устройством и работой различных схем выпрямителей, а также с использованием сглаживающих фильтров.

Исследовать аппарат "Поток-1".

### Принадлежности

Стенды с понижающим трансформатором, диодами и фильтрами. Резисторы, вольтметры, осциллограф, аппарат "Поток-1".

### Введение

#### I. $n$ - и $p$ - проводимости.

Примером кристалла с примесной  $n$ -проводимостью может служить четырехвалентный германий ( $Ge$ ), в который внесены пятивалентный мышьяк ( $As$ ) или сурьма ( $Sb$ ) - донорные примеси. Атомам донора для образования химической связи с атомами германия необходимо только четыре электрона, поэтому каждый пятый электрон атома донора остается свободным. Эти электроны легко отрываются от атома за счет тепловой энергии и в случае приложения к кристаллу напряжения будут перемещаться против направления электрического поля, т.е. от точки с меньшим потенциалом к точке поля с большим потенциалом. Электроны в полупроводнике с  $n$ -проводимостью будут основными носителями зарядов. Атом донора, отдавший электрон, остается в кристалле в виде положительного иона.

В качестве кристалла с  $p$ -проводимостью часто используют четырехвалентный германий с внесенными в него трехвалент-

ными индием ( $Jn$ ) или алюминием ( $Al$ )- акцепторные добавки. У атомов  $Jn$  или  $Al$  не хватает одного электрона для образования химической связи с атомами  $Ge$ . Недостающий для связи электрон захватывается от близлежащего атома  $Ge$ . Отсутствие одного электрона (или, как говорят, образование дырки) эквивалентно появлению положительного носителя зарядов. Образовавшаяся дырка может быть вновь заполнена электроном от соседнего атома и т.д. Таким образом, в кристалле с  $p$ -проводимостью основными носителями зарядов являются дырки, которые с приложением напряжения двигаются в направлении электрического поля, т.е. от точки с большим потенциалом к точке поля с меньшим потенциалом. Атомы акцептора, захватившие электрон, будут отрицательными ионами.

Неосновными носителями зарядов в кристалле с  $n$ -проводимостью будут дырки, в кристалле с  $p$ -проводимостью - электроны. Число неосновных носителей намного меньше числа основных носителей.

## 2. $p$ - $n$ -переход.

Введем полупроводники  $n$ - и  $p$ -типа в тесный контакт. Область контакта толщиной  $1 \dots 0,1$  мкм называют электронно-дырочным переходом ( $p$  -  $n$ -переходом). Пусть внешнее электрическое поле отсутствует.

Носители зарядов в обоих полупроводниках участвуют в тепловом движении, в результате чего происходит диффузия носителей из одного полупроводника в другой. Известно, что в результате диффузии (вспомните диффузию в газах и жидкостях), частицы из области с большей концентрацией перемещаются в область с меньшей концентрацией. Таким образом, из полупроводника  $n$ -типа, электроны диффундируют в полупроводник  $p$ -типа и наоборот - дырки диффундируют в противоположном направлении. Встречаясь в контактном слое, дырки и электроны рекомбинируют. В то же время в прилегающих к контакту слоях образуются нескомпенсированные объемные заряды противоположного знака, т.е. положительного в  $n$ -полупроводнике и отрицательного в  $p$ -полупроводнике ( см. рис. 1).

Наличие объемных зарядов приводит к появлению контакт-

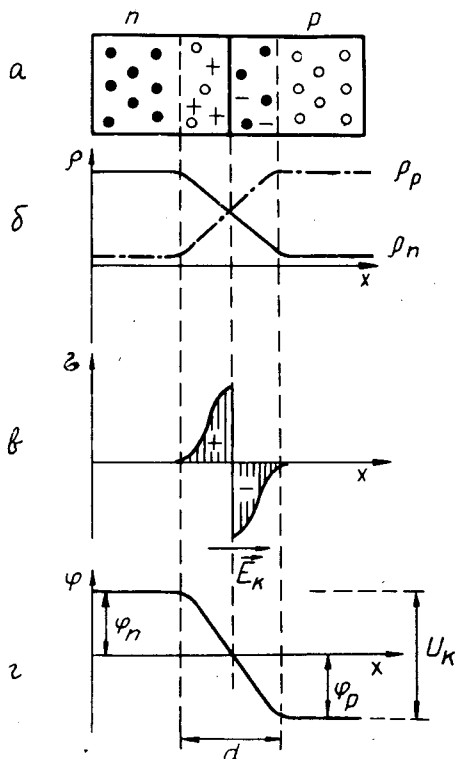


Рис. I. Физические процессы в  $p$ - $n$ -переходе.

- Введенные в контакт  $n$ - и  $p$ -полупроводники.  $\bullet$  - электроны; "+" - ионы донора; "-" - ионы акцептора,  $\circ$  - дырки.
- Плотность основных носителей заряда.  $\rho_p$  - плотность дырок,  $\rho_n$  - плотность электронов.
- Объемные заряды  $\sigma$ .
- Изменение потенциала на  $p$ - $n$ -переходе.  $\varphi_n$  - потенциал в  $n$ -полупроводнике,  $\varphi_p$  - потенциал  $p$ -полупроводника,  $U_k$  - контактная разность потенциалов,  $\vec{E}_k$  - вектор напряженности электрического поля,  $d = 1 \dots 0,1$  мкм,  $U_k \approx 250$  мВ.

ной разности потенциалов  $U_k = \varphi_n - \varphi_p$  и возникновению электрического поля  $E_k$ , направленного от полупроводника  $n$ -типа к полупроводнику  $p$ -типа. На  $p$ - $n$ -переходе возникает потенциальный барьер, который препятствует дальнейшей диффузии основных носителей заряда.

Электрическое поле объемных зарядов отталкивает основные носители от  $p$ - $n$ -перехода. В силу сказанного выше, концентрация носителей заряда в контактном слое будет меньше, чем в отдаленных частях полупроводника (см. рис. I в). Отличие в концентрации носителей заряда может достигать  $10^4$  раз.

Объединенный носителями заряда электронно-дырочный переход является областью со значительным удельным сопротивлением.

### 3. Влияние внешнего напряжения.

Приложим к  $p$ - $n$ -переходу внешнее напряжение  $U$ , так чтобы положительный полюс источника был подсоединен к  $p$ -полупроводнику и отрицательный полюс — к  $n$ -полупроводнику (см. рис. 2). В таком случае говорят, что к  $p$ - $n$ -переходу приложено прямое напряжение. Внешнее электрическое поле имеет направление противоположное электрическому полю, возникающему за счет контактной разности потенциалов. Результирующее электрическое поле уменьшается, уменьшается также высота потенциального барьера. Сила тока основных носителей возрастает и будет зависеть от внешнего напряжения. Прямое напряжение не только уменьшает потенциальный барьер, но и уменьшает толщину  $p$ - $n$ -перехода, а, следовательно, и его сопротивление.

Поскольку высота потенциального барьера составляет только несколько десятых вольт, то уже небольшое внешнее прямое напряжение заметно снижает потенциальный барьер и уменьшает сопротивление запирающего слоя. Ясно, что при некотором внешнем напряжении, потенциальный барьер вообще ликвидируется, и через  $p$ - $n$ -переход потечет, так называемый, прямой ток. Значение силы тока будет зависеть от величины приложенного напряжения и сопротивления цепи. Отметим, что во внешней цепи перемещаются только электроны. Они двигаются от отрицательного полюса источника в  $n$ -полупроводник и

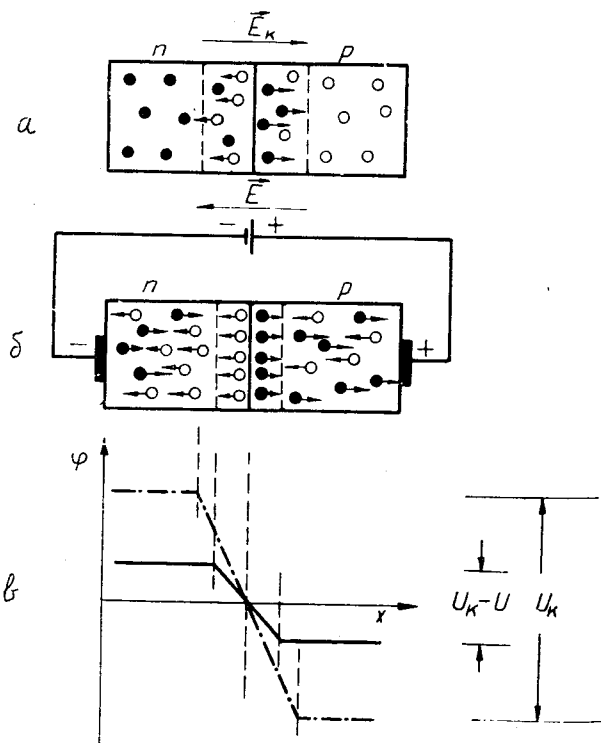


Рис. 2. Физические процессы в случае приложения к переходу прямого напряжения.

- а)  $p-n$ -переход в отсутствие внешнего напряжения ( $\vec{E}_k$  — напряженность электрического поля объемных зарядов);  
 б)  $p-n$ -переход при внешнем прямом напряжении ( $\vec{E}$  — напряженность внешнего электрического поля);  
 в) Изменение потенциала при наличии прямого напряжения:  
 — — — — — до приложения напряжения; — — — — — после приложения напряжения.

компенсируют там потерю электронов, ушедших в результате диффузии в  $p$ -полупроводник. Из  $p$ -полупроводника электроны двигаются к положительному полюсу источника, в результате чего образуются все новые дырки, которые непрерывно перемещаются через  $p-n$ -переход в сторону отрицательного полюса источника.

Подсоединим теперь положительный полюс источника напряжения к  $n$ -полупроводнику, а отрицательный полюс — к  $p$ -полупроводнику. В этом случае говорят, что к  $p-n$ -переходу приложено внешнее запирающее или обратное напряжение (см. рис. 3). Внешнее электрическое поле  $E$  будет теперь направлено по полю объемных зарядов. Результирующее поле увеличивается и возрастает высота потенциального барьера. Это уменьшает силу тока основных носителей почти до нуля. Сила тока неосновных носителей, почти не зависящая от внешнего напряжения, будет мала. Обратное напряжение увеличивает не только потенциальный барьер, но и толщину  $p-n$ -перехода, а, следовательно, и его сопротивление.

#### 4. Полупроводниковые диоды.

Полупроводниковый диод представляет собой кристалл, в котором создан  $p-n$ -переход. Благодаря  $p-n$ -переходу проводимость такой структуры в случае прямого внешнего напряжения в  $10^3, \dots 10^5$  раз больше проводимости в случае обратного напряжения. На рис. 4 приведена вольтамперная характеристика диода.

Эта кривая отражает процессы, которые имеют место в  $p-n$ -переходе. В случае прямого внешнего напряжения (правая часть графика) ток образуется основными носителями зарядов и при повышении напряжения вначале растет по экспоненциальной, а потом по прямой зависимости. При обратном напряжении сила тока неосновных носителей тока невелика (левая часть графика) и быстро достигает насыщения.

При увеличении обратного напряжения больше некоторого критического значения, сила тока может резко возрасти, происходит пробой диода.

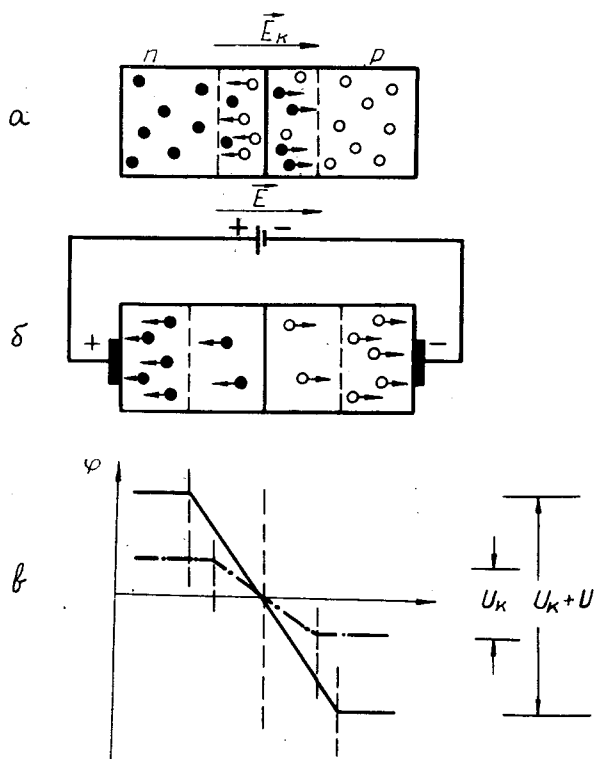


Рис. 3. Физические процессы в случае приложения к  $p-n$ -переходу обратного напряжения.

- а)  $p-n$ -переход в отсутствие внешнего напряжения;
  - б)  $p-n$ -переход при обратном напряжении;
  - в) Изменение потенциала в случае обратного напряжения;
- — — — — в отсутствие напряжения, — — — — — при наличии обратного напряжения.



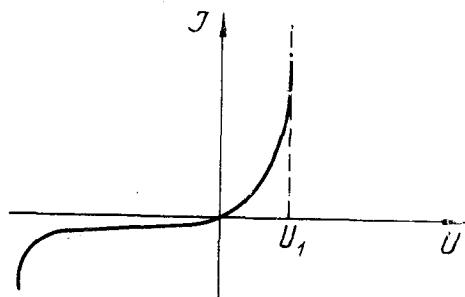


Рис. 4. Вольтамперная характеристика диода.

## 5. Выпрямление переменного тока.

Электрическая энергия электростанций распределяется по линиям передачи в места потребления в виде переменного тока высокого напряжения. Далее напряжение переменного тока неоднократно понижают на трансформаторных подстанциях. Во внутреннюю сеть зданий переменный ток поступает под напряжениями 127, 220 или 380 В. Переменное напряжение широко используется в народном хозяйстве. Однако, в ряде случаев, необходимо иметь постоянный ток. Такой ток используется для питания электронной аппаратуры, приведения в действие двигателей, зарядки аккумуляторов и т.д. Поэтому очень важное значение имеют устройства, позволяющие превращать переменный ток в постоянный или как принято говорить, выпрямлять его.

В основе действия таких устройств – выпрямителей лежит использование электрических вентилей, т.е. приборов, которые пропускают ток только в одном направлении. В качестве вентилей используются электровакуумные диоды-кенотроны (для слабых токов) и в настоящее время нашли широкое применение полупроводниковые диоды, с вольтамперной характеристикой, которого мы выше ознакомились.

На рис. 5 показаны условные обозначения вентилей на электрических схемах.

На рис. 6 приведены схемы различных выпрямителей: 6 а – однополупериодный выпрямитель, 6 б – двухполупериодный выпрямитель, 6 в – мостовая схема.

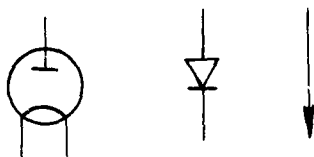


Рис. 5. Условные обозначения вентилей.

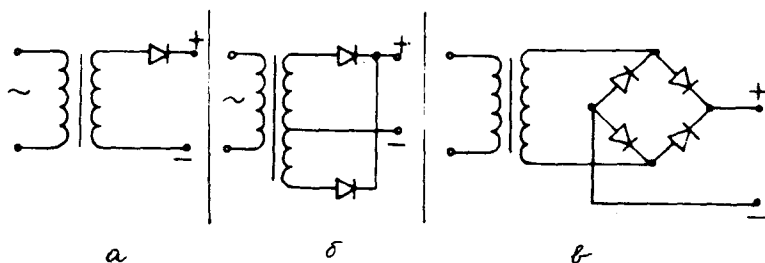


Рис. 6. Схемы выпрямителей.

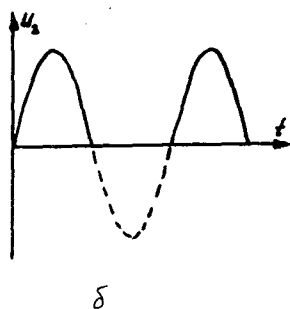
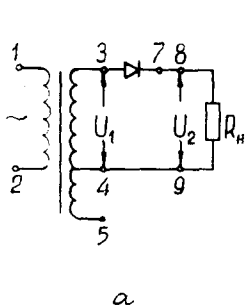


Рис. 7. Получение пульсирующего напряжения в однополупериодном выпрямителе.

Трансформатор нужен для создания напряжения, допустимого для используемых диодов.

В случае использования полупроводниковых диодов следует учесть следующее:

а) Обратное напряжение не должно превышать некоторого допустимого критического значения, начиная с которого электроны, ускоренные электрическим полем, будут выбивать все новые электроны из атомов кристаллической решетки. В таком режиме уже небольшое увеличение напряжения вызывает резкое увеличение силы тока, возникает пробой диода. Режим такого пробоя имеет обратимый характер. Если снизить напряжение, диод выйдет из режима пробоя.

б) Часть приложенного напряжения падает на диоде, в результате на диоде выделяется мощность, диод разогревается. С ростом температуры увеличивается число неосновных носителей зарядов, сила обратного тока увеличивается и снижается допустимое значение обратного напряжения. Если отток тепла неудовлетворителен, происходит тепловой пробой диода, приводящий к необратимому разрушению диода.

Рассмотрим подробнее работу различных схем выпрямителей. На рис. 7 а изображена схема однополупериодного выпрямителя с нагрузкой в виде резистора. При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока, на вторичной обмотке возникает напряжение. Полупериод, в течение которого потенциал точки 3 положителен по отношению к точке 4, к диоду приложено прямое напряжение. Через резистор нагрузки течет прямой ток основных носителей. В последующем полупериоде к диоду будет приложено обратное напряжение и через резистор течет только очень слабый ток неосновных носителей. Напряжение, получаемое на выходе выпрямителя, будет пульсирующим (см. рис. 7 б).

Однако, использование пульсирующего напряжения не всегда допустимо. Для уменьшения или полной ликвидации пульсаций используют электрические фильтры. Самым простым фильтром является конденсатор довольно большой емкости, подключаемый параллельно нагрузке (см. рис. 8 а). Конденсатор заряжается в тот полупериод, когда через диод проходит ток и разряжается через нагрузку в течение следующего полупериода, поддер-

живая в нагрузке ток в течение всего периода.

Уменьшение пульсаций напряжения при подключении фильтра показано на рис. 8 б.

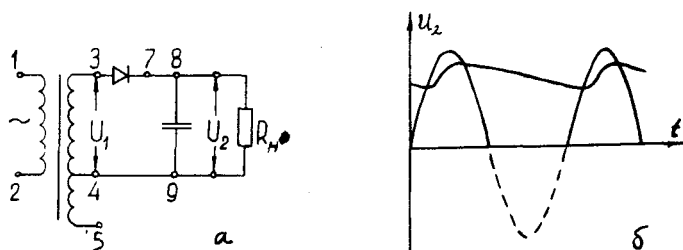


Рис. 8. Схема однополупериодного выпрямителя с конденсатором в качестве фильтра.

Еще более совершенным является фильтр, состоящий из катушки с железным сердечником — дросселем, обладающим большой индуктивностью, и двух конденсаторов. Катушка подключается последовательно с резистором нагрузки. Э.д.с. самоиндукции в катушке противодействует изменениям тока. Она ослабляет ток во время нарастания и поддерживает во время его убывания (см. рис. 9).

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя по схеме рис. 10 а.

В полупериод, когда точка 3 имеет положительный потенциал относительно точки 5, ток идет через верхний диод и резистор нагрузки к средней точке вторичной обмотки трансформатора (ток проходит через точки 3, 7, 8, 9, 4). В течение второго полупериода, когда потенциал точки 3 отрицателен относительно точки 5, ток идет через нижний диод и сопротивление нагрузки также к средней точке трансформатора (по кругу 5, 7, 8, 9, 4). Ток через резистор в оба полупериода проходит в одном и том же направлении.

На рис. 10 б показана зависимость напряжения от времени на выходе двухполупериодного выпрямителя без фильтра и при использовании конденсатора в качестве фильтра.

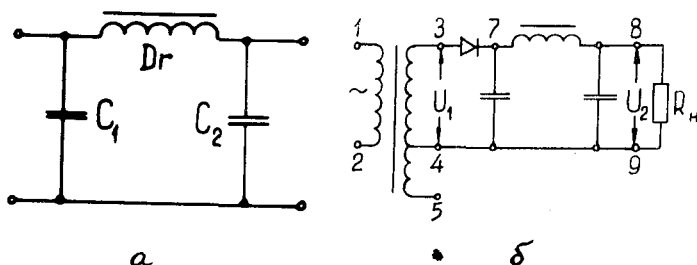


Рис. 9.  $\Pi$ -фильтр и схема однополупериодного выпрямителя с  $\Pi$ -фильтром.

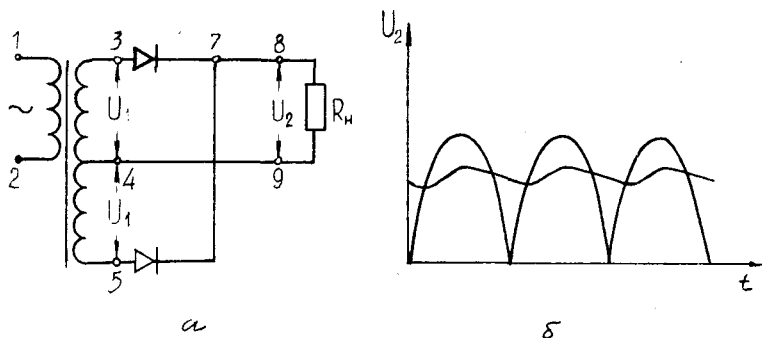


Рис. 10. Схема двухполупериодного выпрямителя.

На рис. II приведена рабочая мостовая схема выпрямителя. Проанализируйте работу этой схемы самостоятельно.

#### 6. Использование постоянного тока в лечебных целях.

Ткани организма представляют по своим электрическим свойствам разнородную среду. Плотные части тканей, состоящие из белков, жиров, углеводов и т.д., являются по существу диэлектриками. Жидкости, омывающие ткани (кровь, лимфа, тканевые жидкости) — электролиты. В результате ткани довольно хорошие проводники постоянного тока. Сухая кожа обладает большим сопротивлением. Внутри организма пос-

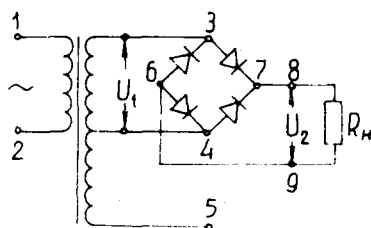


Рис. II. Мостовая схема.

тоянный ток распространяется в основном по кровеносным и лимфатическим сосудам, мышцам, оболочкам нервных стволов.

Электропроводимость тканей и органов зависит от их функционального состояния и может служить как показатель в диагностике.

Прохождение постоянного тока приводит к перемещению ионов. Вследствие различной подвижности ионов, а главным образом задержки и накопления их у полупроницаемых мембран, в структурных элементах ткани, а прежде всего снаружи и внутри клетки, происходит изменение обычной концентрации ионов. Это вызывает изменения в функциональном состоянии клетки и другие физиологические процессы в тканях, что можно использовать в лечебных целях. Лечебный метод, при котором используется действие слабого постоянного тока на ткани организма, называют гальванизацией (токи до 50 мА).

Обычно гальванизацию совмещают с введением при помощи постоянного тока в ткани организма лекарственных веществ, образующих в растворе ионы или заряженные частицы (лечебный электрофорез).

При гальванизации постоянный ток к участку тканей подводят с помощью проводов и металлических пластинчатых электродов. Наложение металлических электродов прямо на кожу недопустимо, так как образующиеся на их поверхности продукты электролиза раствора хлористого натрия, содержащегося в тканях и в составе пота, обладают прижигающим свойством.

Поэтому под электроды укладывают прокладки из гигроскопической материи, смоченные физиологическим раствором или водой, в которых скапливаются продукты электролиза.

Если одновременно осуществляют и лечебный электрофорез, то прокладку под положительным электродом смачивают лекарственным раствором, содержащим положительные ионы, в прокладку под отрицательным электродом — растворами, содержащими отрицательные ионы.

Используемое в этих методах небольшое (40 — 60 В) постоянное напряжение получают путем выпрямления переменного тока осветительной сети.

На рис. 12 приведена принципиальная схема аппарата для гальванизации, в котором для выпрямления тока использована мостовая схема из полупроводниковых диодов и фильтр, состоящий из последовательно нагрузке подсоединенных резисторов и параллельно подключенных конденсаторов.

Трансформатором напряжение сети предварительно снижают до напряжения, необходимого для работы диодов. Разделительный трансформатор необходим и для безопасности пациента. Существование только индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками трансформатора исключает возможность непосредственного подклю-

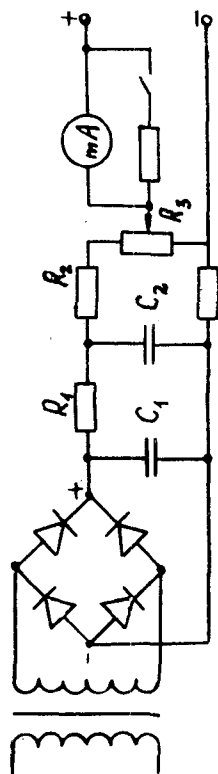


Рис. 12. Принципиальная схема аппарата для проведения гальванизации.

динения напряжения сети переменного тока к цепи пациента. Фильтры необходимы для ликвидации пульсаций напряжения. Резистор  $R_3$ , подключенный как потенциометр, позволяет регулировать выходное напряжение. Сила тока измеряется с помощью миллиамперметра.

При подключении аппаратов для гальванизации к пациенту, следует позаботиться о том, чтобы поблизости не было заземленных конструкций.

### 7. Аппарат "Поток-1".

На рис. 13 изображены схематически внешние панели аппарата для гальванизации "Поток-1". Этот аппарат служит для получения постоянного тока силой 50 мА при сопротивлении нагрузки 500 Ом и предназначен для воздействия на ткани организма постоянным током и проведения лечебного электрофореза.

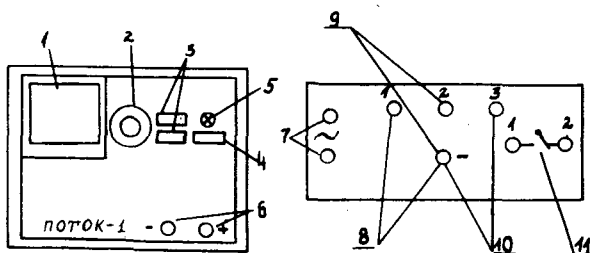


Рис. 13. Аппарат "Поток-1".

Он может использоваться в клинике или стационаре для лечения хирургических, неврологических, гинекологических, стоматологических и других заболеваний. Аппарат собран по схеме, аналогичной схеме рис. 12.

Корпус аппарата выполнен из изоляционного материала (класс защиты 2). На лицевой панели расположены: миллиамперметр 1, ручка регулятора тока в цепи пациента 2 (крайнее левое положение - нулевое напряжение на выходе), клавиши 3, включения диапазонов сил тока "5 мА" и "50 мА",



кнопка 4 включения сети, лампочка сигнальной лампы 5, выходные клеммы 6 "+" и "-" (клеммы пациента).

В аппарате имеется блокирующее устройство, исключающее появление тока в цепи пациента при включении аппарата и переключении режима работы, если ручка регулятора тока пациента не установлена в крайнем левом (нулевом) положении.

В целях более подробного ознакомления с работой аппарата в практикуме на боковой панели дополнительно сделаны следующие отведения из схемы аппарата: со вторичной обмотки трансформатора (переменное напряжение " $\sim$ ") — клеммы 7, непосредственно с двухполупериодной схемы — клеммы 8 на рис. 13 (на панели эти клеммы обозначены как "-", "1"); клеммы 9 напряжения с первой ступени фильтра (на панели это клеммы "-", "2"); клеммы 10 окончательно выпрямленного напряжения с потенциометра (на панели "-", "3"). Переключатель II на боковой панели в положении I отключает часть схемы, начиная с первой ступени фильтра.

В положении 2 этот переключатель отключает часть схемы, начиная со второй ступени фильтра.

## Ход работы

### Исследование различных схем выпрямителей и фильтров.

I. Из элементов цепи, выполненных в виде блоков, соберите схему однополупериодного выпрямителя (рис. 7 а) (проследите за тем, чтобы диод имел полярность, указанную на схеме!). Вольтметр, рассчитанный на измерение переменного напряжения, подсоедините к точкам 3, 4. Вольтметр постоянного напряжения — к резистору нагрузки (точки 8, 9). Выпрямленное напряжение с резистора подключите к  $\bar{y}$ -входу осциллографа. Включив в сеть схему и осциллограф, подберите подходящие чувствительности входов осциллографа и частоту генератора развертки. Чувствительности входов должны оставаться постоянными в продолжении всей работы.

Мягким карандашом нанесите график пульсирующего напряжения с экрана осциллографа на кальку. Показания вольтметров ( $U_1$  и  $U_2$ ) занесите в таблицу I.

Таблица I

Тип выпрямителя	Фильтр	$U_{эфф1}(B)$	$U_{m1}(B)$	$U_2(B)$
Однополупериодный	Без фильтра конденсатор $\Pi$ - фильтр			
Двухполупериодный	Без фильтра конденсатор $\Pi$ - фильтр			
Мостовая схема	Без фильтра конденсатор $\Pi$ - фильтр			

Подключите в схему конденсатор (соблюдайте полярность), а затем замените его  $\Pi$  - фильтром согласно рис. 8а и 9а. Проанализируйте изменения, которые произошли в графиках напряжения на экране. Нанесите графики на кальку и запишите значения  $U_1$  и  $U_2$ .

2. Соберите схему двухполупериодного выпрямителя (рис. 10а), а затем схемы двухполупериодного выпрямителя с фильтрами. Зарисуйте графики напряжения и измерьте  $U_1$  и  $U_2$ .

3. То же самое сделайте для мостовой схемы.

4. В протоколе должны содержаться все использованные схемы. Рисунки на кальке, с нанесенными графиками напряжения, вклейте в протокол, указав к каким схемам графики относятся.

5. Напишите краткий анализ результатов наблюдений.

Исследование аппарата "Поток-I".

1. Ознакомьтесь по описанию с назначением всех ручек управления аппаратом и боковых клемм.

Убедитесь, что стрелка миллиамперметра при невключенном аппарате стоит на нуле. Если это не выполняется, выведите стрелку на нуль с помощью корректора. Подключите к клеммам 6 пациента нагрузочное сопротивление 500 Ом.

Установите ручку регулятора силы тока 2 в крайнее левое

положение. Подключите аппарат к сети. Нажав клавишу "50 мА", и вращая регулятор силы тока, убедитесь, что ток регулируется до 50 мА. Аппарат готов к работе. Верните ручку регулятора силы тока в нулевое положение.

2. С помощью специальных проводов подайте напряжение с клемм ("~") боковой панели на  $y$ -вход осциллографа. Подбрав подходящие значения чувствительностей входов и частоту развертки, получите график этого напряжения на экране осциллографа и нанесите его на кальку.

3. Получите на экране и зарисуйте на кальку графики напряжений с клемм:

"-", "1"	в положении переключателя "1"
"-", "2"	в положении переключателя "2"
"-", "3"	

4. Проанализируйте результаты наблюдения. Рисунки поместите в протокол, снабдив их соответствующими пояснениями.

## Вопросы

1. Поясните физический смысл процессов, происходящих на  $p-n$ -переходе?
2. Прибором какой системы можно измерять как переменное, так и постоянное напряжение?
3. Нарисуйте схему двухполупериодного выпрямителя с кенотронами.
4. Может ли напряжение  $U_2$  превысить напряжение  $U_1$ :  
а) при наличии нагрузки? б) в отсутствие нагрузки?
5. В каком случае простой конденсатор дает почти полностью сглаженное напряжение?
6. Что называют эффективным значением силы тока (напряжения)?
7. В каких единицах измеряют емкость и индуктивность?
8. Как зависит сглаживающий фактор фильтра от сопротивления нагрузки?

9. Какие приборы относятся по классу защиты к классу II?

10. Почему при подключении пациента к аппарату для гальванизации, следует позаботиться о том, чтобы поблизости не было заземленных конструкций?

#### Литература

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики для медвузов. I., М., "Высшая школа", 1978, с. 175-178.

## ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

### Задание

Ознакомиться с устройством и принципом работы транзистора. Снять статические характеристики транзистора при включении его с общим эмиттером. Изучить связь характеристик с основными параметрами транзистора.

### Принадлежности

Стенд с транзистором, блок питания, миллиамперметр, микроамперметр, вольтметр, милливольтметр.

### Введение

**Транзистор.** Транзистор представляет собой электронное устройство для усиления или генерирования электрических сигналов, действие которого основано на управлении концентрацией и движением носителей заряда.

Транзистор можно рассматривать как два  $p-n$  перехода, включенных последовательно (о  $p-n$  переходе читайте описание работы № 5 этого сборника).

Имеется две возможности последовательного соединения двух  $p-n$  переходов. В соответствии с этим можно получить два типа транзисторов:  $n-p-n$  и  $p-n-p$  (см. рис. I). Средняя область транзистора называется базой. По обе стороны от базы располагаются эмиттер и коллектор. Смысл этих названий выяснится позднее в процессе рассмотрения принципа действия транзистора.

$p-n$  переход между эмиттером и базой называется эмиттерным переходом, между базой и коллектором - коллекторным переходом. Транзисторы изготавливают с очень тонким базовым слоем (не более 20 мкм) по сравнению с размерами эмиттер-

ного и коллекторного слоев. Кроме того, концентрация примеси в базе обычно значительно меньше, чем в эмиттере и коллекторе.

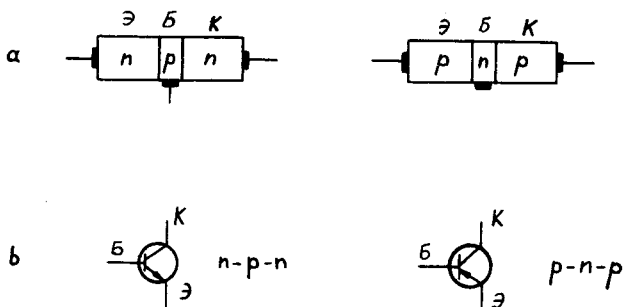


Рис. I. Транзистор.

- а) расположение  $p$ - и  $n$ -полупроводников в  $n-p-n$  и  $p-n-p$  транзисторах; б) схематическое обозначение транзисторов: Э — эмиттер, Б — база, К — коллектор.

В схематическом обозначении транзисторов (рис. I) стрелка указывает всегда эмиттерный вывод, причем, направление стрелки соответствует условному направлению тока в эмиттерном выводе (т.е. от "+" к "-"). Можно еще запомнить, что стрелка всегда направлена в сторону  $n$ -полупроводника.

Займемся теперь анализом принципа работы транзистора в т.н. активном статическом режиме. В таком случае к транзистору подключаются для питания только источники постоянного напряжения  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  таким образом, чтобы на эмиттерном переходе было прямое, а на коллекторном — обратное напряжение (см. рис. 2). Вспомним теперь процессы, происходящие при подаче прямого и обратного напряжений на  $p-n$  переход. При подаче прямого напряжения  $U_{БЭ}$  на эмиттерном переходе уменьшаются как высота потенциального барьера, так и толщина и сопротивление запирающего слоя. Через эмиттерный переход идет эмиттерный ток  $J_э$ , состоящий, главным образом, из электронов, диффундирующих из эмиттера ( $n$ -полупроводник) в базу ( $p$ -полупроводник). Так как толщина базы очень мала, а концентрация основных носителей заряда (дырок) в ней значительно меньше, чем концентрация электронов в эмиттере, то дырки захватывают (рекомбинируют) небольшое коли-

чество пришедших из эмиттера электронов. Движение электронов через базу в направлении к положительному полюсу источника тока  $\xi_1$  называют базовым током  $J_B$ .

Большинство электронов, пришедших в базу, проходит через нее и попадает в электрическое поле коллекторного перехода, направление которого таково, что оно способствует дальнейшему движению электронов в коллектор. Обратное напряжение на коллекторном переходе обеспечивает повышение потенциала коллектора относительно базы (увеличена высота потенциального барьера), но именно это и является обстоятельством, способствующим дальнейшему движению электронов (вспомним, что в электрическом поле **электроны** движутся против поля, т.е. в направлении к более высокому потенциалу).

Из коллектора электроны идут по проводнику к положительному полюсу источника тока  $\xi_2$ , создавая таким образом, коллекторный ток  $J_K$ . На основании приведенных рассуждений можно заключить, что

$$J_3 = J_B + J_K. \quad (I)$$

Аналогично можно рассматривать работу  $p-n-p$  транзистора.

Для транзисторов вместе взятых принцип их действия сводится к следующему. Небольшое прямое напряжение на эмиттерном переходе открывает этот переход для неосновных по отношению к базе носителей заряда, которые и переходят из эмиттера в базу. Только небольшая доля этих носителей заряда рекомбинирует с основными носителями заряда базы, обуславливая этим слабый базовый ток; большинство их направляется в область коллекторного перехода. На коллекторный переход подается обратное напряжение, действующее на неосновные по отношению к базе носители заряда как прямое, т.е. способствует движению их из базы в коллектор, возникает коллекторный ток. Коллекторный ток почти равен эмиттерному, причем оба они значительно больше базового тока.

У транзисторов малой мощности коллекторное напряжение  $U_{K3}$  порядка 5 - 20 В, базовое  $U_{B3}$  0,1 - 0,5 В, коллекторный ток  $J_K \approx 1 - 10$  мА, а базовый ток  $J_B \approx 50 - 200$  мкА.

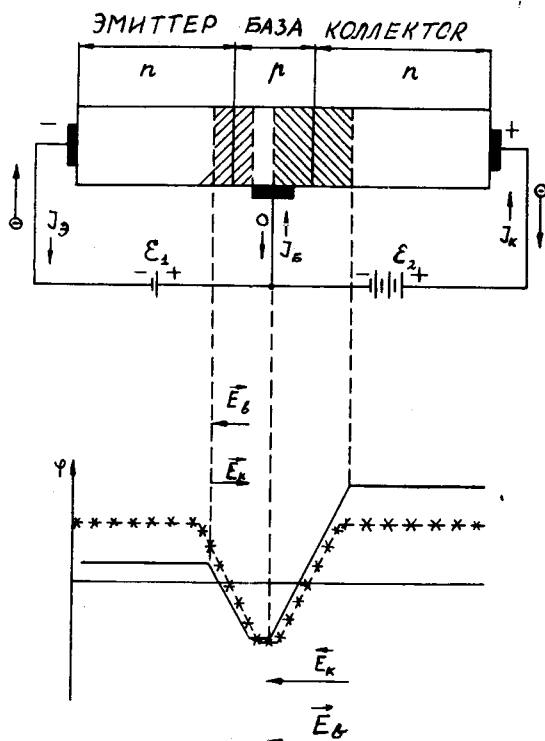


Рис. 2. Физические процессы в  $n-p-n$  транзисторе.

- а) на переход эмиттер - база подается прямое, на переход база - коллектор обратное напряжение. Знак  $\ominus \rightarrow$  показывает направление движения электронов во внешней цепи.
- б) потенциальный барьер на эмиттерном переходе понижается, на коллекторном повышается.

$\vec{E}_к$  и  $\vec{E}_б$  - векторы напряженности полей, созданных соответственно пространственными зарядами и подключённым источником тока.



Использование транзистора для усиления сигналов

Приблизительная пропорциональность, токов  $J_э$ ,  $J_б$ ,  $J_к$  между собой — одно из важнейших свойств транзистора. Прямая пропорциональная зависимость между токами вытекает из равенства (I), которое должно выполняться всегда. Из этого же равенства вытекает следующая зависимость между изменениями токов:

$$\Delta J_э = \Delta J_б + \Delta J_к. \quad (2)$$

Ранее мы выяснили, что при малом прямом напряжении  $U_{бэ}$  на эмиттерном переходе возникают эмиттерные и коллекторные токи, значительно превышающие по силе базовый ток. При изменении значения  $U_{бэ}$  в некоторых пределах изменяются все токи  $J_э$ ,  $J_б$ ,  $J_к$ . Из прямой пропорциональной зависимости между этими токами следует, что малые изменения базового тока сопровождаются значительно большими изменениями эмиттерного и коллекторного токов. Таким образом, становится ясно, что с помощью маленькой входной или базовой мощности  $P_б = J_б \cdot U_{бэ}$  можно управлять большей выходной или коллекторной мощностью  $P_к = J_к \cdot U_{кэ}$ . Такое явление называют усилением.

Имеется некоторая аналогия между транзистором и вакуумным триодом: база транзистора подобна сетке, эмиттер — катоду, коллектор — аноду вакуумного триода. В случае триода усиливаемый сигнал подается на сетку, в случае транзистора на базу. Существенным различием между этими приборами является то, что в случае триода, сеточного тока практически нет (сетка не потребляет мощности), в случае же транзистора всегда имеется базовый ток (хотя и слабый), ибо без этого транзистор работать не может.

Основные параметры транзистора

Усиливающие свойства транзистора считаются полностью определенными, если известны коэффициенты усиления тока, напряжения и мощности, а также входное и выходное сопротивления. Эти величины зависят от способа включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) или общим эмиттером (ОЭ). Самый распространенный способ последний.

Коэффициент усиления  $\beta$  по току  $\beta = \frac{\Delta J_K}{\Delta J_B}$ , ( $U_{KЭ} = \text{const}$ ).

Входное сопротивление  $R_{вх} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta J_B}$ , ( $U_{KЭ} = \text{const}$ ).

Крутизна  $S = \frac{\Delta J_K}{\Delta U_{БЭ}}$ , ( $U_{KЭ} = \text{const}$ ).

Выходное сопротивление  $R_{вых} = \frac{\Delta J_{KЭ}}{\Delta J_K}$ , ( $J_B = \text{const}$ ).

В этих формулах  $\Delta J_B$ ,  $\Delta J_K$  — малые приращения базового и коллекторного токов,  $\Delta U_{БЭ}$ ,  $\Delta U_{КЭ}$  — малые приращения базового и коллекторного напряжений.

В настоящей работе снимаются статические характеристики транзистора, показывающие, как изменяются интересующие нас напряжения и токи без нагрузки в коллекторной цепи. Для снятия динамических характеристик в коллекторную цепь включается нагрузочное сопротивление. В настоящей работе последнее не предусматривается.

#### Ход работы

Для снятия характеристик соберите схему согласно рис. 3. На коллекторную цепь следует подать напряжение от вывода (0 + 12) В источника, на базовую цепь — (0 + 2) В, причем к эмиттеру присоедините положительную клемму источника питания (положительные клеммы источника питания уже соединены между собой).

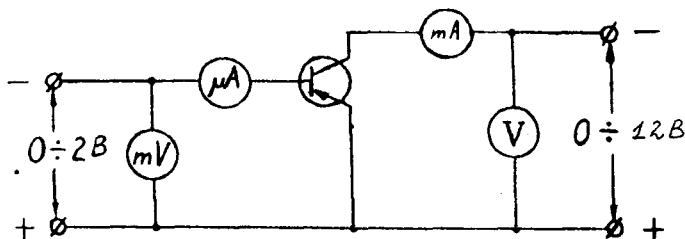


Рис. 3. Схема для определения основных параметров  $p-n-p$  транзистора в случае общего эмиттера.

Для снятия входных характеристик следует базовое напряжение изменять ступенями по 0,02 – 0,04 В в пределах от 0 до 0,3 – 0,4 В, записывая в таблицу  $J_B$  и  $J_K$  (показания соответственно микроамперметра и миллиамперметра). Измерения выполните при коллекторных напряжениях 4,5 В и 12 В.

Результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{K3} = \dots$		
$U_{B3}(В)$	$J_B(мкА)$	$J_K(мА)$
.....	.....	.....

Для снятия выходных характеристик установите базовое напряжение 150 мВ и сохраните его постоянным в ходе измерений. Коллекторное напряжение изменяйте ступенями по 1 В от 0 до 9 В (12 В), и при каждом его значении сделайте отсчет коллекторного тока. В самом начале характеристики следует снять точки, изменяя коллекторное напряжение по 0,2 В (в пределах 0 – 1 В). Измерения повторите при базовом напряжении 200 мВ. Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 2

$J_B = \dots$ или $U_{B3} = \dots$	
$U_{K3}(В)$	$J_K(мА)$
.....	.....

Выходные характеристики можно снимать также при постоянном базовом токе (например, 30 мкА, 50 мкА и 100 мкА), измеряя по-прежнему  $U_{кз}$  и отсчитывая значения  $J_k$ . По какому из указанных вариантов производить измерения, решает руководитель практикума.

По полученным результатам постройте (на миллиметровой бумаге) графики

$$J_B = f(U_{бз}), J_k = f(U_{кз}) \text{ и } J_k = f(J_B), \text{ при} \\ U_{кз} = \text{const}; J_k = f(U_{кз}) \text{ при } J_B = \text{const} \text{ или } U_{бз} = \\ = \text{const}.$$

На основании этих графиков вычислите основные параметры транзистора — коэффициент усиления  $\beta$ , входное сопротивление  $R_{вх}$ , выходное сопротивление  $R_{вых}$ .

Нахождение параметров транзистора по характеристикам происходит следующим образом.

Допустим, что измерена зависимость  $J_k = f(J_B)$  (рис. 4). Для нахождения коэффициента усиления по току в некоторой точке  $A$  проведем касательную к графику  $J_k = f(J_B)$  в этой точке, на ней выберем отрезок  $BC$  таким образом, чтобы  $AB = AC$ . Координаты точек  $B$  и  $C$  равны соответственно  $J_k(B)$ ,  $J_B(B)$  и  $J_k(C)$ ,  $J_B(C)$ .

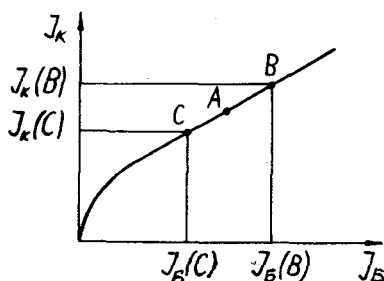


Рис. 4. Определение коэффициента усиления по току  $\beta$ .

$$\text{Коэффициент усиления } \beta = \frac{\Delta J_k}{\Delta J_B} = \frac{J_k(B) - J_k(C)}{J_B(B) - J_B(C)}.$$

Аналогично можно найти и остальные параметры по соответствующим характеристикам, найденным опытным путем.

### Вопросы

1. Дайте определение величин – электрическое поле, напряжение, потенциал.
2. Какие напряжения следует приложить к  $p-n-p$  транзистору?
3. Как действует на работу транзистора его нагрев?
4. Как использовать транзистор для усиления электрических сигналов?
5. Как возникает потенциальный барьер на переходах?
6. Как объясняются  $n$  - и  $p$  - проводимости полупроводников, исходя из наличия примесей?
7. Объясните принцип работы  $n-p-n$  транзистора.
8. Почему в полупроводнике не рассматривается движение ионов?
9. Объяснить, как будет вести себя  $n-p-n$  транзистор, если подать на коллектор потенциал отрицательный по отношению к потенциалу эмиттера?

### Литература

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики. I. М., "Высшая школа", 1978, с. 178-181.
2. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских вузов. М., "Высшая школа", 1982, с. 207-214.

## ИЗУЧЕНИЕ ЛАМПОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

### Цель работы

Ознакомиться с устройством и принципом работы резисторного усилителя. Изучить зависимость частотной характеристики усилителя от параметров схемы и выявить причины появления искажений.

### Принадлежности

Ламповый усилитель, источник питания, генератор звуковой, электронные вольтметры, осциллограф.

### Ламповый низкочастотный усилитель

Электронным усилителем называют устройство для усиления электрических сигналов без искажения их формы. Усилители усиливают входной сигнал по напряжению, по току или по мощности.

Как основной элемент усилители входят во многие электронные приборы, в том числе и медицинские. Особенно широкое применение в медицинской аппаратуре находят усилители медленно изменяющихся сигналов – усилители постоянного тока, а также низкочастотные усилители ( $20-20 \cdot 10^3$  Гц). Ниже рассмотрим принцип работы низкочастотного резисторного усилителя на пентода (рис. I).

Подогреваемый катод пентода испускает электроны, которые под действием электрического поля перемещаются к аноду (с анодом соединен положительный полюс источника питания), образуя ток через лампу – анодный ток. Вблизи катода распола-

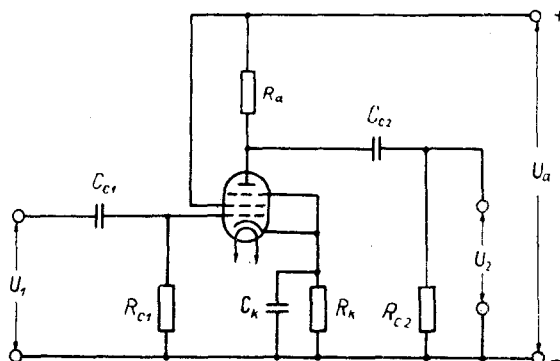


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя.

гается управляющая сетка. Изменением потенциала сетки относительно катода регулируют число электронов, попадающих на анод, т.е. эта сетка служит для управления анодным током.

Защитная сетка (ближняя к аноду) имеет одинаковый с катодом потенциал и препятствует попаданию выбитых из анода вторичных электронов на экранирующую сетку, которая имеет положительный потенциал и служит для ликвидации паразитной емкости между катодом и анодом.

На рис. 2 приведена динамическая характеристика лампы, характеризующая зависимость анодного тока от напряжения на управляющей сетке при наличии анодной нагрузки. В случае значительного отрицательного напряжения на сетке лампа заперта - анодный ток равен нулю. По мере уменьшения отрицательного потенциала на сетке сила анодного тока увеличивается до значения тока насыщения. Это соответствует тому, что все электроны, вылетевшие из катода, достигают анода. В отсутствие входного сигнала  $U_1$  положение "рабочей точки"  $A$  на характеристике определяется отрицательным смещением  $-U_{co}$  на сетке. Оно создается за счет падения напряжения на резисторе  $R_k$  (рис. 1) при прохождении анодного тока. Нижний конец этого резистора имеет, относительно катода, отрицательный потенциал, который подается на сетку через резистор  $R_{c1}$ , верхний конец с более высоким потен-

циалом подсоединен к катоду.\* Значение  $-U_{c0}$  выбирается таким, чтобы точка  $A$  находилась в центре линейной части характеристики.

При подаче входного напряжения  $U_1$  (конденсатор  $C_{c1}$  пропускает только переменную составляющую сигнала и служит также для исключения попадания напряжения смещения на источник сигнала) потенциал управляющей сетки будет изменяться. Рабочая точка на характеристике будет совершать колебания между точками  $A_1$  и  $A_2$ . Это приведет к колебаниям анодного тока (рис. 2). Напряжение на резисторе  $R_{c2}$ , изменяющееся в такт с входным напряжением, будет выходным сигналом  $U_{вых}$ . Конденсатор  $C_{c2}$  служит для выделения переменной составляющей сигнала.

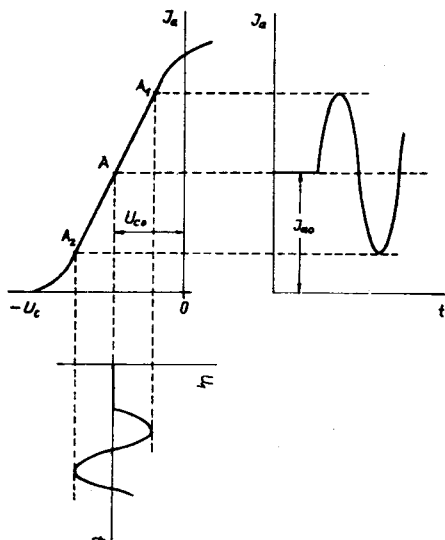


Рис. 2. Динамическая характеристика лампы.

На рис. 3 показано возникновение нелинейных искажений в случае сравнительно большой амплитуды входного напряжения,

\* Конденсатор  $C_k$  служит для пропускания переменной составляющей анодного тока.



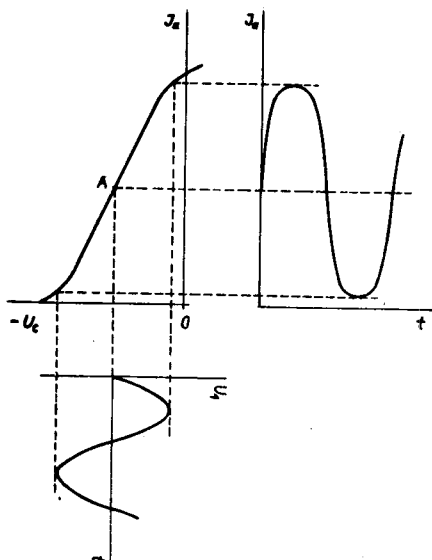


Рис. 3. К возникновению нелинейных искажений.

когда рабочая точка смещается за пределы линейной части характеристики.

Коэффициентом усиления усилителя по напряжению называют отношение

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

Значение  $K$  иногда выражают в децибеллах

$$K(дБ) = 20 \lg K = 20 \lg \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

В нашей схеме (рис. I)

$$K = \frac{U_2}{U_1}.$$

Другим важным показателем усилителя является его частотная характеристика, т.е. зависимость коэффициента  $K$  от частоты  $f$  усиленного напряжения. На рис. 4 приведен вид характерной для резисторного усилителя частотной характеристики. Участок частот, где коэффициент мало зависит от

частоты, называют полосой пропускания усилителя (обычно допускается уменьшение коэффициента усиления до значения  $0,7 K_{\max}$ ).

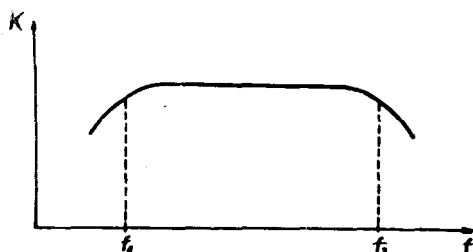


Рис. 4. Частотная характеристика.

При выборе усилителя нужно следить за тем, чтобы его полоса пропускания соответствовала частотному спектру усиливаемого сигнала. В противном случае возникнут частотные искажения, т.е. в выходном сигнале не будет всех частот входного сигнала.

Спад коэффициента усиления на больших и малых частотах вызывают элементы схемы, параметры которых зависят от частоты (конденсаторы, катушки), а также паразитные емкости и индуктивности.

Например, входная и выходная цепи усилительного каскада представляют собой потенциометр (рис. 5), в котором емкостное сопротивление конденсатора  $X_c$  зависит от частоты. При уменьшении частоты оно растет, что влечет к уменьшению поступающего на сетку лампы напряжения  $U_1$ , а это, в свою очередь, приводит к уменьшению выходного сигнала каскада. Емкости (в том числе паразитные) включенные параллельно сигналу шунтируют его сильнее на высоких частотах, вызывая тем спад усиления.

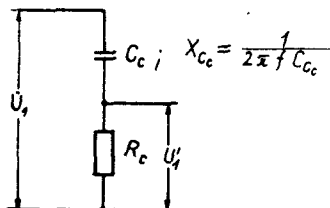


Рис. 5. Входная цепь усилительного каскада.

## Выполнение работы

### I. Снятие частотных характеристик усилителя.

Схема применяемого в работе усилителя приведена на рис.6. Усилитель смонтирован на пластмассовой панели. Снимается две характеристики с различными заданными руководителем величинами  $C_{c2}$  и  $C_n$ .

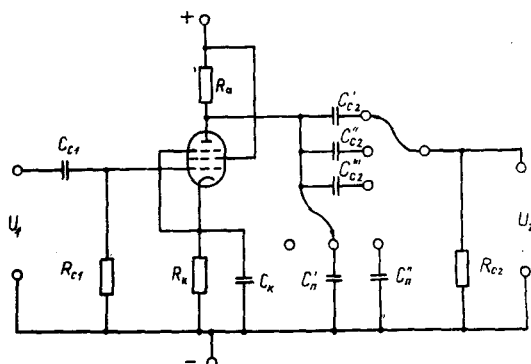


Рис. 6. Схема экспериментального усилителя.

Соедините применяемые приборы согласно схеме рис. 7. Заземляемые клеммы приборов присоедините к общему минусовому проводу усилителя.

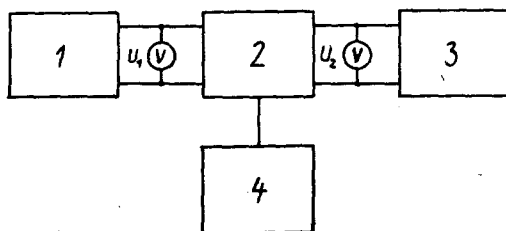


Рис. 7. Блок-схема опытной установки.

I - генератор сигналов; 2 - исследуемый усилитель; 3 - электронный осциллограф; 4 - источник питания усилителя; V - вольтметры электронные.

Если используемый генератор сигналов содержит вольтметр, измеряющий его выходное напряжение, то вольтметр для измерения входного напряжения  $U_1$  усилителя не подключают.

После проверки схемы руководителем практикума включите приборы и дайте им прогреться 4...5 минут.

Подав на вход усилителя напряжение от генератора, получите на экране осциллографа изображение выходного сигнала. Поддерживая входное напряжение постоянным и изменяя частоту генератора в пределах полосы пропускания усилителя, проверьте по изображению колебаний на экране осциллографа не появляются ли где-нибудь искажения. Если искажения появляются, следует уменьшить величину входного напряжения. При изменении частоты генератора следует изменять и частоту генератора развертки осциллографа.

Выбранное входное напряжение поддерживается постоянным при снятии всей характеристики усилителя.<sup>§</sup> Измерьте величину выходного напряжения на следующих частотах: 20; 25; 30; 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10 000, 15 000, 20 000, 30 000, 40000, 50 000, 60 000, 80 000, 100 000 Гц.

Результаты измерений занесите в таблицу I.

Таблица I

$C_{сз} = \dots$		$C_n = \dots$	
Частота $f$ (Гц)	Входное напряжение $U_1$ (В)	Выходное напряжение $U_2$ (В)	Коэффициент усиления K

§

Во многих генераторах сигналов (ГЗ-33; ГЗ-34 и аналогичных) выходное напряжение поддерживается постоянным независимо от частоты.

По полученным данным постройте частотные характеристики на полулогарифмической бумаге ( $K$ -в линейном масштабе,  $f$ -в логарифмическом масштабе).

Проанализируйте причины различий в частотных характеристиках.

## 2. Наблюдение искажений.

Используйте предыдущую схему. На одной из средних частот полосы пропускания усилителя медленно увеличивайте входное напряжение, наблюдая за изменением формы выходного напряжения на экране осциллографа. Заметьте, при каком входном напряжении появляются искажения. Зарисуйте форму неискаженного выходного сигнала, а также с малыми и большими искажениями. Постарайтесь объяснить причины наблюдаемых искажений.

## Вопросы

1. Для чего в усилителе на управляющую сетку лампы подается отрицательное смещение?

2. Почему в резисторном усилителе анод предыдущей лампы соединяется с сеткой следующей лампы через конденсатор?

3. Как влияет выбор рабочей точки на характеристике лампы на нелинейные искажения?

4. Почему триод непригоден для усиления высоких частот?

5. Какова полоса пропускания усилителя кардиографа?

6. Какова полоса пропускания усилителя низкой частоты радиовещательного приемника?

7. Как по вашему будет звучать радиопередача, если вместо усилителя звуковой частоты приемника применить усилитель кардиографа?

8. Почему при уменьшении емкости сеточных конденсаторов усилителя, низкочастотная граница частотной характеристики смещается в сторону высоких частот?

9. Какими мерами можно расширить полосу пропускания усилителя в обе стороны?

10. Почему при снятии частотной характеристики приходится одновременно с изменением частоты генератора изменять и

частоту развертки осциллографа?

#### Литература

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики. I. М., "Высшая школа", 1978, с. 149-162.
2. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики. М., "Высшая школа", 1982, с. 266-272.

## ИЗУЧЕНИЕ УСИЛИТЕЛЯ ФОНОКАРДИОГРАФА

### Задание

Ознакомиться с принципом работы фонокардиографического усилителя и снять его частотную характеристику.

### Принадлежности

Блок фонокардиографического усилителя и блок его питания (включены в общий корпус), генератор ГЗ-33 (ГЗ-34), электронный вольтметр, осциллограф.

### Усилитель фонокардиографа.

Фонокардиограф предназначен для регистрации звуков сердца (тонов и шумов). Для этого к области сердца прикладывается специальный микрофон (датчик). Возникающий в микрофоне слабый электрический сигнал усиливается и записывается при помощи самопишущей системы на бумажной ленте. Обычно фонокардиограмма записывается одновременно с электрокардиограммой. Анализ фонокардиограммы дает дополнительную информацию о состоянии сердца. Частотный спектр генерируемых сердцем звуков лежит в области 10 - 800 Гц. В спектре больного сердца обычно содержится больше высокочастотных составляющих. Были сделаны попытки выяснить механизмы возникновения различных частот. Например, А.М. Кирсанов установил, что сигналы с частотой 12,5 - 20 Гц генерируются миокардом желудочков сердца, 200 - 400 Гц - натяжением сухожильных нитей и т.д. Таким образом, изучение спектральных изменений фонокардиограммы позволяет локализовать патологические процессы.

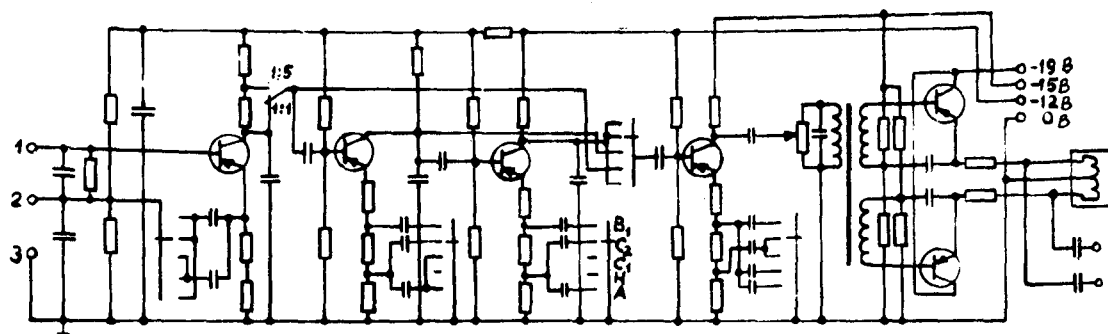


Рис. I. Схема усилителя фонокардиографа.

1, 2 - входные клеммы; 3 - соединение с корпусом;  $V$  - вибратор самопишущего прибора;  
0 - клеммы подсоединения осциллографа.



Входной сигнал фонокардиографического усилителя (возникающий на выходе микрофона) — порядка 1 мВ. Фонокардиографический усилитель должен обладать изменяемой частотной характеристикой (зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала) для выделения интересующих исследователя частотных областей. Исследуемый фонокардиографический усилитель содержит пять усилительных каскадов (рис. 1) на транзисторах. Первые четыре каскада собраны по схеме усилителя с общим эмиттером, в последнем применен двухтактный усилитель мощности с трансформаторной связью.

На рис. 2 приведена схема одного усилительного каскада с общим эмиттером на  $p-n-p$  транзисторе.

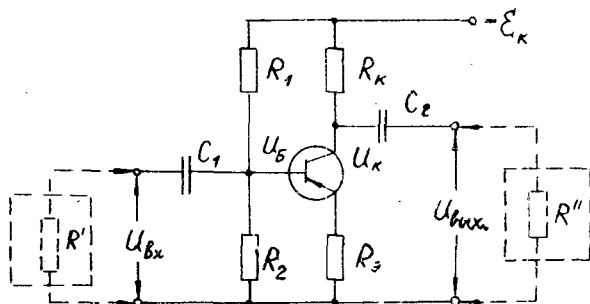


Рис. 2. Схема одного каскада усилителя на транзисторе.

Усиливаемый сигнал (входное напряжение)  $U_{BX}(t)$  подается через конденсатор  $C_1$  на переход база-эмиттер транзистора. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют делитель напряжения, которым устанавливается на базе необходимое отрицательное напряжение смещения:  $-U_{B0} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} E_K$ . Этим смещением и подбором величины  $R_K$  ( $+R_3$ ) устанавливают необходимые для нормальной работы усилителя начальные токи и напряжения транзистора  $U_{B0}$ ;  $U_{K0}$ ;  $I_{K0}$ ;  $I_{E0}$ ;  $I_{B0}$ . Эта процедура называется установкой рабочей точки транзистора или режима по постоянному току.

При поступлении входного сигнала  $U_{BX}(t)$  в такте с ним будет изменяться напряжение между базой и эмиттером, и поэтому в том же такте будет изменяться коллекторный ток

$J_K(t)$ . В том же такте, но уже с большим размахом, чем  $U_{KX}$ , будет изменяться падение напряжения  $U_R$  на сопротивлении  $R_K$ , причем  $U_R(t) = J_K(t) \cdot R_K + J_{K0} \cdot R_K$ . На основании последнего выражения можно определить напряжение на коллекторе  $U_K$ .\*

Максимально возможная величина усиленного сигнала  $U_{вых}$  равняется переменной составляющей  $U_R(t)$ , т.е. той доле  $U_R(t)$ , которая изменяется в такте с входным сигналом:

$$U_{вых\max} = J_K(t) \cdot R_K.$$

На самом деле всегда  $U_{вых} < U_{вых\max}$ . Причина будет объяснена ниже. Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  выполняют в схеме двойную роль.

Во-первых, они развязывают по постоянному току данный усилительный каскад от предыдущих и последующих каскадов, т.е. позволяют сохранять неизменной выбранную рабочую точку транзистора. Так,  $C_1$  предотвращает попадание напряжения смещения  $U_{Б0}$  в источник входного сигнала (датчик, предшествующий усилительному каскаду или какая-либо другая часть прибора) и в то же время исключает влияние сопротивления источника сигнала  $R'$  на величину  $U_{Б0}$ . Если убрать  $C_1$ , то в выражении  $U_{Б0} = \mathcal{E}_K \frac{R_K}{R_1 + R_K}$  вместо  $R_K$  нужно подставить  $\frac{R' \cdot R_K}{R' + R_K}$  (почему?) и видно, что режим работы усилителя стал бы зависеть от параметров источника сигнала (от  $R'$ ). Сказанное действительно в полной мере и для  $C_2$ , если вместо параметров источника подразумевать параметры нагрузки.

Во-вторых, от выборе емкостей конденсаторов зависит частотная характеристика усилителя. В цепи переменного тока конденсатор обладает зависящим от частоты  $f$  емкостным сопротивлением  $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ . Чем меньше частота  $f$  сигнала, тем больше емкостное сопротивление, и наоборот. Если сопротивление нагрузки (последующий каскад или др. приборы) равно  $R''$ , то величина выходного сигнала

$$U_{вых} = U_{вых\max} \cdot \frac{R''}{R'' + X_C} = J_K(t) \cdot R_K \cdot \frac{R''}{R'' + X_C}.$$

\* Так как  $\mathcal{E}_K = U_K + U_R$ , то  $U_K = \mathcal{E}_K - U_R$ . Значит, напряжение на коллекторе в режиме постоянного тока равно  $U_{K0} = \mathcal{E}_K - J_{K0} \cdot R$  и при наличии усиливаемого сигнала  $U_K = U_{K0} - J_R R_K$ .

Отсюда видно, почему всегда  $U_{вых} < U_{вых\max}$ , а также что величина выходного сигнала (равно как и коэффициент усиления) зависит от частоты усиливаемого сигнала. При неизменной емкости  $C_2$  вместе с уменьшением частоты уменьшается  $U_{вых}$  и говорят, что коэффициент усиления спадает в области низких частот. Точно так же влияет на частотную характеристику емкость  $C_1$ . Если мы хотим избежать падения усиления в области низких частот, то мы должны увеличить емкости  $C_1$  и  $C_2$ .

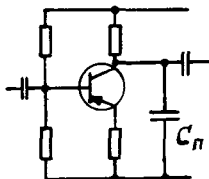


Рис.3. Влияние конденсаторов на частотную характеристику.

Емкости  $C_n$ , подключенные параллельно к нагрузке  $R''$  (рис. 3), уменьшают усиление в области высоких частот, и чем больше  $C_n$ , тем меньше становится коэффициент усиления. Почему? Аналогично влияют емкости, подключенные параллельно сопротивлениям  $R_2$  или  $R'$ .

Существует множество приемов изменения коэффициента усиления и частотной характеристики. Рассмотрим более детально частотнозависимую отрицательную обратную связь, которая используется в усилительных каскадах фонокардиографа.

Если в эмиттерный контур тока включить резистор  $R_3$ , то при работе усилителя на сопротивлении возникает падение напряжения  $[J_3(t) + J_{30}] \cdot R_3$ . Переменное падение напряжения  $J_3(t) \cdot R_3$ , которое является частью выходного сигнала  $U_{вых}$ , складывается с входным сигналом  $U_{вх}$  в противофазе, т.е. уменьшает сигнал, подаваемый на переход база-эмиттер и вместе с тем коэффициент усиления. Здесь мы имеем дело с отрицательной обратной связью — часть выходного сигнала направляют обратно ко входу и, таким образом, управляют работой схемы. Отрицательную обратную связь можно не только увеличить или уменьшить, увеличив или уменьшив величину сопротивления  $R_3$ , но и сделать зависящей от частоты,

подключив параллельно с  $R_3$  или его частью емкости  $C_3$  разной величины (рис. 4).

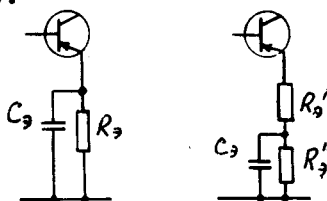


Рис. 4. Регулирование обратной связи.

Так как емкостное сопротивление  $X_C = 1/\omega C$ , то при увеличении частоты сигнала отрицательная обратная связь уменьшается и усиленный эффект увеличивается.

Изменяя в исследуемом усилителе при помощи переключателя величины  $R_3$  и  $C_3$ , можно, по необходимости, изменять частотную характеристику усилителя. Для получения нужного коэффициента усиления можно изменить также число работающих каскадов.

Для получения подходящей частотной характеристики можно использовать также индуктивности (индуктивное сопротивление катушки зависит от частоты  $X_L = \omega L$ ) или фильтры, т.е. разные комбинации из индуктивностей и емкостей. В исследуемом усилителе эти возможности не используются.

На переднюю панель исследуемого блока фонокардиографического усилителя вынесены: переключатель частотных характеристик, ступенчатый переключатель чувствительности и регулятор усиления.

Обозначения на переключателе частотных характеристик:

- А - аускультативная,
- Н - низкочастотная,
- $\left. \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \end{matrix} \right\}$  - среднечастотные,
- $B_I$  - высокочастотная.

## Выполнение работы

Снимите две различные частотные характеристики фонокардиографического усилителя согласно заданию руководителя. Для этого соедините используемую аппаратуру согласно схемам на рис. 5.

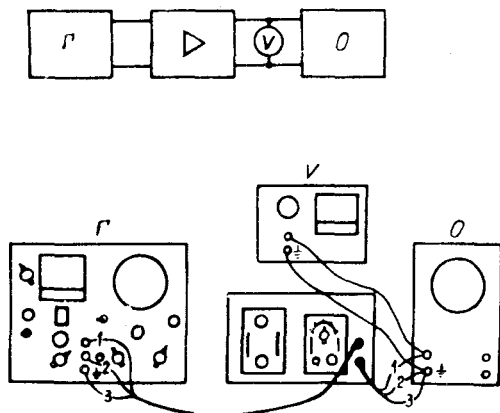


Рис. 5. Блок-схема опыта.

Г - генератор сигналов, О - осциллограф, V - электронный вольтметр, У - усилитель.

После проверки схемы руководителем включите все приборы на прогревание (5 мин). Ступенчатый переключатель чувствительности переведите в положение 1:5 и регулятор усиления установите между делениями I и 2. Положение переключателя характеристик установите согласно заданию руководителя.

Выходное напряжение генератора ГЗ-33 показывает встроенный в корпус прибора вольтметр. Выбранное напряжение автоматически поддерживается постоянным на всех частотах. Предел шкалы вольтметра должен быть 10 мВ и выходное сопротивление генератора 50 Ом. Подаваемое на вход усилителя напряжение выберите между I - 2 мВ.

Подайте от генератора на вход усилителя входной сигнал и, изменяя частоту сигнала, найдите частоту, соответствующую максимальному усилению усилителя. При помощи органов

управления осциллографа получите на его экране подходящее по размерам изображение выходного сигнала усилителя. Не изменяя величины входного сигнала и положения регулятора усиления усилителя, измерьте выходные напряжения на частотах: 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10 000, 12 000, 15 000 Гц. Результаты измерений занесите в следующую таблицу:

Таблица I

Тип частотной характеристики (А, Н, С <sub>1</sub> , С <sub>2</sub> , В)				
Частота $f$ (Гц)	Входное напряжение $U_{вх}$ (В)	Выходное напряжение $U_{вых}$ (В)	Коэффициент усиления	
			$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$	$K (дБ)$

Примечание. Вследствие несовершенной экранировки измерительной схемы в нее могут попасть помехи извне, а также может возникнуть паразитная генерация. Это все видно на экране осциллографа. Если на экране возникнут не соответствующие частоте генератора колебания (опасность их появления наибольшая на участках наибольшего усиления усилителя), то при проведении измерений такую частоту следует пропустить.

По полученным данным начертите характеристики  $K = y(f)$  на одном листе полулогарифмической бумаги (коэффициент усиления  $K$  - в линейном, частоту  $f$  - в логарифмическом масштабе).

Проанализируйте результаты.

### Вопросы

1. Что является причиной нелинейных искажений в усилителе?
2. Чем вызываются частотные искажения усилительных систем?
3. Как будет звучать музыкальная радиопередача, если вместо усилителя звуковых частот в приемнике использовать

усилитель фонокардиографа?

4. Какое влияние оказывает на восприятие сердечных звуков при аускультации (при помощи уха) спектральная характеристика слухового ощущения и тот факт, что с повышением частоты поглощение звука в тканях увеличивается?

5. Почему в настоящей работе при снятии частотных характеристик одновременно с изменением частоты генератора приходится изменять и частоту развертки осциллографа?

6. Как вырезать коэффициент усиления в децибеллах? Например, каково усиление в дБ, если усилитель усиливает сигнал в 2000 раз?

#### Литература

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики. I. М., 1978, с.147-149, 181-187.
2. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики, М., 1982, с. 266-273.

## ИЗУЧЕНИЕ УВЧ-ГЕНЕРАТОРА

### Задание

Ознакомиться с принципом работы и устройством УВЧ-генератора. Снять резонансную кривую. Изучить распределение УВЧ-поля. Изучить нагревание электролита и диэлектрика в УВЧ-поле.

### Принадлежности

Медицинские УВЧ-генераторы, газоразрядная неоновая лампа-индикатор на изолированной ручке, измерительный прибор, две лампы накаливания, фотометр, автотрансформатор, вольтметр, амперметр, провода, стенд для изучения распределения поля, микроамперметр, кюветы с жидкостями, термометр на подставке, секундомер.

Ламповый генератор служит для получения незатухающих электрических колебаний. Упрощенная схема однотактного лампового генератора приведена на рис. I.

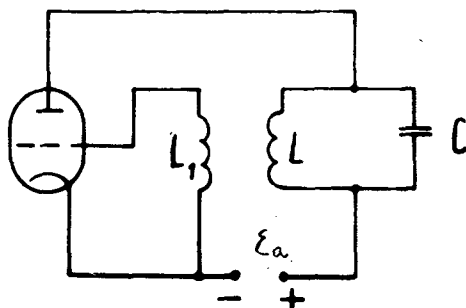


Рис. I. Упрощенная схема однотактного генератора.



При включении источника анодного напряжения через лампу потечет анодный ток, конденсатор  $C$  колебательного контура  $LC$  генератора получит заряд, который, в свою очередь, обеспечит возникновение колебательного процесса в контуре. Переменный ток, протекающий в катушке  $L$ , индуцирует на концах катушки  $L_1$  обратной связи переменную электродвижущую силу. В течение полупериода, в котором направление тока в катушке контура совпадает с направлением анодного тока, потенциал лампы будет положителен. В результате анодный ток усиливается, увеличивая и ток в контуре. В последующий полупериод сетка будет иметь отрицательный потенциал, анодный ток ослабляется или прекращается, что способствует возникновению тока в контуре противоположного направления. Таким образом, генератор можно рассматривать и как усилитель, усиливающий собственные колебания. Передача дополнительной энергии в колебательный контур происходит только в течение одного полупериода, когда лампа отпирается, т.е. когда через лампу протекает анодный ток.

В практике, в частности в медицине, используют двухтактную схему, обеспечивающую значительную мощность колебаний.

Двухтактный генератор состоит, в принципе, из двух однотактных генераторов, имеющих общий колебательный контур в анодных цепях двух ламп. Лампы генератора отпираются и запираются поочередно. В течение каждого полупериода ток протекает только через одну лампу. Таким образом, передача энергии в контур происходит в оба полупериода.

Упрощенная схема медицинского двухтактного генератора приведена на рис. 2.

Незатухающие колебания возникают в контуре  $L_1 L_2 C_1 C_2$ . В отличие от ранее рассмотренного генератора, обратная положительная связь обеспечивается с помощью конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$ . Конденсаторы  $C_5$  и  $C_6$ , а также катушка  $L$  служат для регулирования обратной связи.

Резистор  $R$  служит для создания отрицательного смещения на сетках ламп. Конденсаторы  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  иногда могут отсутствовать в схеме — их роль выполняют паразитные емкости между анодом и сеткой, а также сеткой и катодом.

С колебательным контуром генератора индуктивно связан

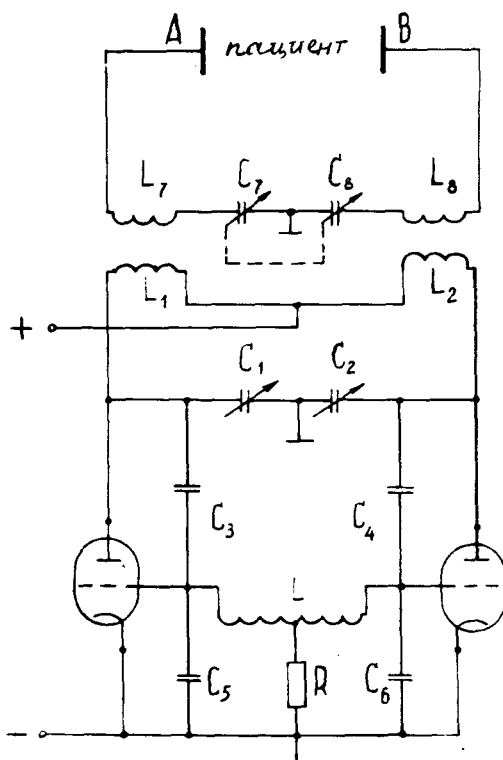


Рис. 2. Упрощенная схема двухтактного генератора.

терапевтический контур (контур пациента), который образуют катушки  $L_7$ ,  $L_8$ , конденсаторы  $C_7$  и  $C_8$  и плоские электроды  $A$  и  $B$ . Высокочастотным полем, образующимся между электродами  $A$  и  $B$ , воздействуют на подлежащий лечению участок тела пациента. Передача энергии из контура генератора в контур пациента будет максимальной, если контуры настроены на одинаковую частоту. Электроды  $A$  и  $B$  вместе с участком тела образуют конденсатор, от емкости которого будет зависеть собственная частота контура пациента. В каждом конкретном случае эта емкость будет несколько различной. Чтобы обеспечить максимальное воздействие на участ-

ток тела, емкости конденсаторов  $C_7$  и  $C_8$  делают регулируемые. Это позволяет настроить контур пациента в резонанс с контуром генератора.

Емкости конденсаторов  $C_7$  и  $C_8$  регулируют с помощью ручки "НАСТРОЙКА" на передней панели генератора.

По постановлению Министерства связи СССР медицинские УВЧ-генераторы могут работать только на частотах 40,68 МГц (+ 2 %) и 152,5 МГц (+ 1 %). Используемые в нашей лаборатории аппараты работают на частоте 40,68 МГц.

С внешним видом медицинского генератора УВЧ можно ознакомиться по рис. 3.

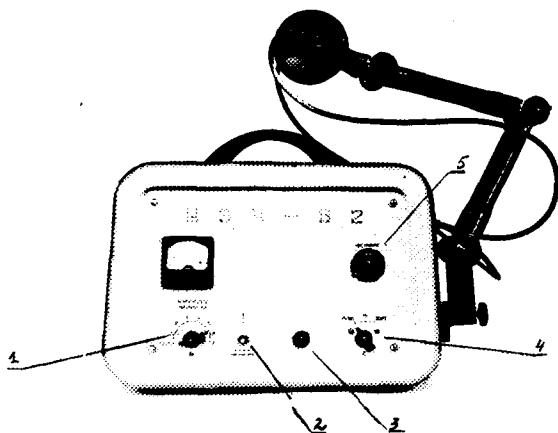


Рис. 3. Лицевая панель аппарата УВЧ-62.

Внутри аппарата, помимо генератора УВЧ-колебаний, смонтирован и выпрямитель для питания генератора от сети переменного тока.

#### Ход работы

##### 1. Устройство аппарата.

Переключатель 1 служит для включения и подбора необходимого по величине напряжения на первичной обмотке трансформатора блока питания. Клавиша 2 служит для контроля

этого напряжения. Сигнальная лампа 3 загорается при включении напряжения сети. Переключатель 4 служит для включения анодного напряжения и изменения мощности в контуре пациента. Миллиамперметр  $mA$  служит для индикации резонанса и контроля напряжения питания. Регулятор 5 служит для настройки контура пациента в резонанс с частотой генератора. Подлежащая воздействию высокочастотного поля часть тела пациента помещается между плоскими пластинами – электродами  $A$  и  $B$ . Проверьте, находятся ли штекеры электродов  $A$  и  $B$  в гнездах генератора. Если нет – вставьте их и расположите электроды на одном уровне параллельно друг другу на расстоянии 3 – 4 см.

Включите генератор в присутствии преподавателя. Для этого установите переключатель 4 в положение I (рис. 3). Сигнальная лампа 3 должна загораться. Нажмите на клавишу 2, проверьте напряжение питания: при нормальном напряжении стрелка миллиамперметра должна отклониться в черный (красный) сектор шкалы миллиамперметра. Если стрелка не достигнет вышеуказанного положения, следует переключатель 1 перевести в положение 2, 3 и т.д. После прогрева катода лампы генератора в течение 1,5 – 2 минут поверните переключатель 4 в положение 15 Вт. Поместите между электродами индикаторную неоновую лампочку и, вращая регулятор 5 настройки контура пациента, добейтесь наиболее яркого свечения лампочки. В этот момент ток через миллиамперметр будет максимальным.

При включении генератора сначала выведите переключатель 4, а затем переключатель 1 в положение "Вкл.".

Если надо изменить положение электродов  $A$  и  $B$ , отключайте только переключатель 4.

## II. Измерение мощности генератора.

Часто необходимо знать мощность поля, воздействующего на пациента. В случае высоких частот поля традиционные методы измерения мощности применять нельзя. Поэтому, в этой работе используется косвенный метод определения мощности.

Между плоскими электродами контура пациента поместите лампу накаливания  $S_1$ , которая тоже имеет плоские элект-

троды. Номинальная мощность лампы должна быть немного выше мощности генератора. Другую лампу  $S_2$  такой же мощности подключите к автотрансформатору "АТ". Для измерения напряжения и тока через лампу  $S_2$  служат соответственно вольтметр и амперметр. Схема включения приведена на рис. 4.

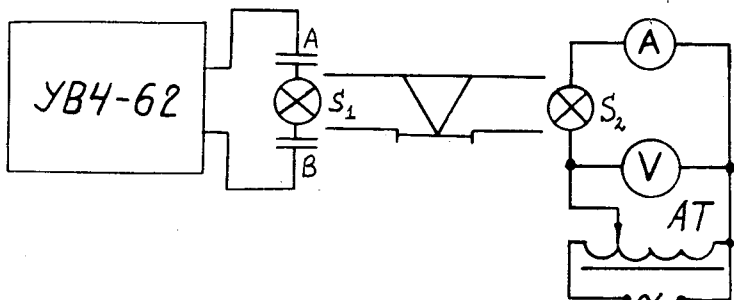


Рис. 4. Схема для измерения мощности.

Между двумя лампами поместите фотометр, так чтобы лампы располагались на одинаковом расстоянии от торцов тубуса фотометра. Включите УВЧ-генератор на мощность 30 Вт. Вращая ручку "Настройка", добейтесь максимального свечения лампы  $S_1$ . С помощью автотрансформатора отрегулируйте накал лампы  $S_2$ , так чтобы обе половинки поля зрения фотометра имели одинаковую освещенность. В таком случае будут одинаковыми и мощности излучения ламп  $S_1$  и  $S_2$ . Мощность, потребляемую лампой  $S_2$ , вычислите по показаниям амперметра и вольтметра. Полученная величина и является мощностью генератора.

### III. Снятие резонансной кривой.

Для снятия резонансной кривой отключите плоские электроды терапевтического контура и подключите к генератору измерительный прибор — миллиамперметр, снабженный резисторами и диодом. Включите генератор. Вращая ручку регулятора "Настройка", запишите показания прибора для всех делений шкалы этого регулятора.

При проведении измерений экспериментатор должен располагаться по возможности дальше от прибора и не двигаться, чтобы не влиять на показания. По данным измерений построй-

те резонансную кривую в координатных осях: "деление прибора" - "деление шкалы регулятора "Настройка"".

#### IV. Изучение распределения высокочастотного поля.

Поле между электродами контура пациента не однородно. Распределение напряженности УВЧ-поля зависит от расстояния между электродами и их взаимного расположения. Для изучения распределения поля используют электрический диполь, который подключается к микроамперметру (рис. 5).

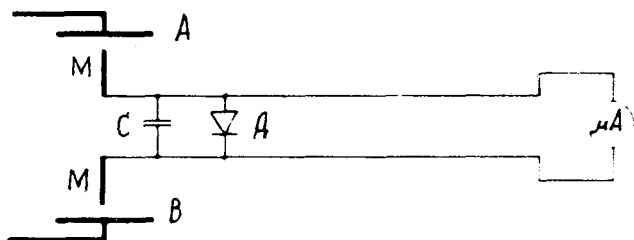


Рис. 5. Схема диполя.

Электрический диполь состоит из двух металлических стержней, соединенных через конденсатор  $C$ . Под влиянием УВЧ-поля в контуре, образуемом двумя стержнями  $M$  и конденсатором  $C$ , возникают колебания тока с частотой поля. Высокочастотный ток разрядки конденсатора  $C$  выпрямляют с помощью полупроводникового диода  $D$ , и выпрямленный ток измеряют микроамперметром.

В данной работе для изучения распределения поля используют отдельно стоящий генератор со стендом I. На подвижной каретке 3 стенда размещены диполь, конденсатор и диод (рис. 6).

Для изучения распределения поля генератора расположите диполь в центре поля между электродами  $A$ ,  $B$ , перемещая каретку с помощью ручки 8. При этом следите за тем, чтобы электроды располагались параллельно, а диполь к ним - перпендикулярно. В присутствии преподавателя включите генератор и освещение шкалы микроамперметра 4. Переключатель мощности генератора установите в положение 15 Вт. Настройте терапевтический контур в резонанс. Показание микроампермет-

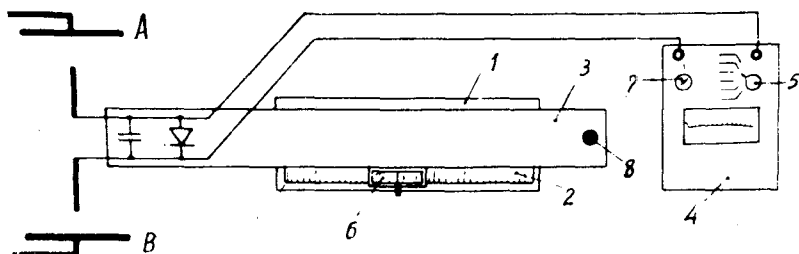


Рис. 6. Схема для измерения распределения поля.

ра должно составлять  $3/4$  шкалы. При необходимости следует изменить чувствительность микроамперметра (переключатель 5).

Перемещая диполь с помощью каретки в обе стороны от первоначального положения, запишите показания микроамперметра через каждый сантиметр положения указателя 6 относительно шкалы 2.

Во время измерений экспериментатор должен находиться по возможности дальше от электродов, чтобы не вызывать искажения поля генератора. Вблизи установки не должны находиться посторонние лица.

Распределение электрического поля между электродами представьте графически (зависимость показания микроамперметра от положения диполя).

#### У. Изучение нагревания электролита и диэлектрика в УВЧ-поле.

С точки зрения электропроводимости живые ткани представляют собой сложную систему, состоящую из электролитов и диэлектриков. Электролиты можно характеризовать омическим сопротивлением, диэлектрики — диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

При наличии электрического поля в электролите, как в любом проводнике, происходит перемещение свободных носителей заряда, т.е. течет ток проводимости.

В УВЧ-поле, где направление тока изменяется миллионы раз в секунду, ионы электролита успевают незначительно переместиться за время одного полупериода.

В силу этого УВЧ-поле практически не вызывает необрати-

мого изменения концентрации ионов в клетке. Явление трения при движении ионов в электрическом поле обуславливает выделение тепла в живой ткани. Количество теплоты, которое выделяется в единице объема электролита в единицу времени, может быть найдено по формуле:

$$q_1 = k_1 q E, \quad (1)$$

где  $q_1$  - количество теплоты,  $q$  - проводимость электролита,  $E$  - напряженность электрического поля,  $k_1$  - коэффициент пропорциональности.

В диэлектрике, помещенном в электрическое поле, происходит образование диполей (смещение отрицательных и положительных зарядов в молекуле) или же ориентация уже имеющих полярных молекул вдоль силовых линий поля. В переменном электрическом поле полюсы диполей периодически переориентируются. Такую переориентацию диполей называют током смещения.

Наличие тока смещения также приводит к выделению тепла. Количество теплоты, выделяемое в единице объема диэлектрика за единицу времени, может быть найдено по формуле:

$$q_2 = k_2 f \varepsilon E^2 \sin \delta, \quad (2)$$

где  $q_2$  - количество теплоты,  $f$  - частота изменения поля,  $\varepsilon$  - электрическая проницаемость диэлектрика,  $E$  - напряженность электрического поля,  $\delta$  - угол потерь, который показывает отставание колебаний диполей по фазе от колебаний электрического поля,  $k_2$  - коэффициент пропорциональности.

На основании формулы (2) можно заключить, что выделяемое в тканях количество теплоты увеличивается с ростом частоты.

В данном пункте работы в качестве диэлектрика используется касторовое масло, а в качестве электролита - раствор поваренной соли. Схема опыта приведена на рис. 7.

Кувету с раствором поместите между плоскими электродами генератора  $A$  и  $B$ . Электроды должны вплотную прилегать к кувете. С помощью винта  $N$  опустите термометр и введите



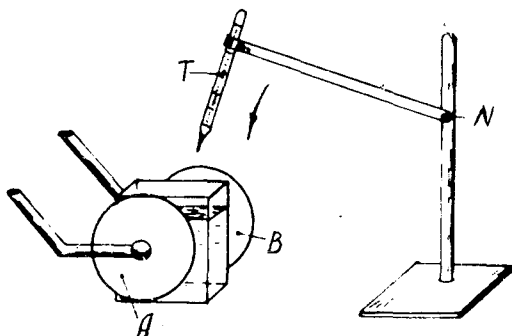


Рис. 7. К измерению температуры.

его в жидкость так, чтобы он не прикасался к стенками кюветы. Включите генератор и настройте терапевтический контур в резонанс частоте генератора. Включите секундомер. Через каждую минуту (в течение 10 минут) запишите в таблицу температуру жидкости. Постройте графики  $T = f(t)$  для электролита и диэлектрика.

### Вопросы

1. Почему разрешается работать с медицинским УВЧ-генератором только определенным лицам?
2. Почему не разрешается воздействовать на пациента непосредственно колебательным контуром генератора, а только с помощью отдельного терапевтического контура, связанного с первым индуктивно?
3. Почему меняется настройка терапевтического контура, если между его электродами поместить пациента? Изменить его положение между электродами?

### Литература

1. Ливенцев Н.М. Курс физики для медвузов. М., "Высшая школа", 1966, с. 271-291.
2. Ливенцев Н.М. Электромедицинская аппаратура. М., "Медицина", 1964.

## ИСТОЧНИКИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

### Задание

Ознакомиться с влиянием электрических импульсов на ткани организма. Изучить процессы зарядки и разрядки конденсатора в  $RC$ -цепи и ознакомиться с использованием этой цепи для изменения формы импульсов. Изучить импульсы на выходах генератора пилообразного напряжения и мультивибратора, рассмотреть использование  $RC$ -цепей в качестве дифференцирующей и интегрирующей цепей.

### Принадлежности

Генератор пилообразного напряжения, мультивибратор, стенды с  $RC$ -цепями, осциллограф.

### Введение

1. Электрическим импульсом называют кратковременное отклонение силы тока или напряжения от некоторого постоянного значения.

Для описания импульсов тока используются следующие понятия: амплитуда импульса  $I_m$ , длительность переднего фронта импульса  $t_{np}$ , длительность импульса  $t_u$ , длительность заднего фронта  $t_{zp}$ , активная длительность  $t_{ua}$ . Смысл этих понятий ясен из рис. 1.

Импульсы тока часто характеризуют крутизной переднего и заднего фронтов

$$S_n = \frac{I_m}{t_{np}}, \quad S_z = \frac{I_m}{t_{zp}}. \quad (1)$$

Все перечисленные выше величины используются и для описания импульсов напряжения.

Если электрические импульсы следуют друг за другом периодически во времени (рис. 2), то используются понятия периода  $T$ , частоты следования  $F = \frac{1}{T}$ , длительности паузы  $t_0$  между импульсами, скважности следования импульсов  $Q = \frac{T}{t_u} = \frac{1}{F t_u}$  и величины обратной скважности - коэффициент заполнения  $k = \frac{1}{Q} = F t_u$ .

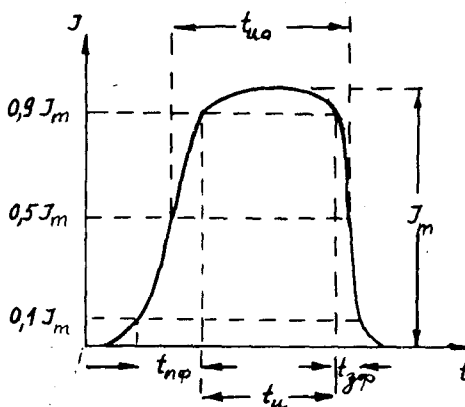


Рис. 1. Характеристики импульса.

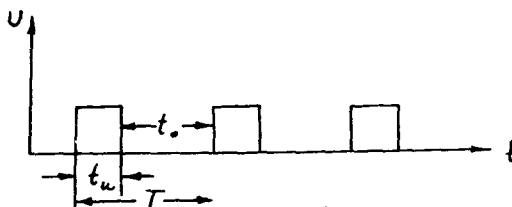


Рис. 2. Ряд импульсов.

2. Под воздействием электрического тока изменяются концентрации ионов в электролите тканей по обе стороны от мембраны клетки и, следовательно, потенциалы на поверхностях мембраны. В клетке происходит ряд биофизических и физиоло-

гических процессов, в результате ткань возбуждается.

Экспериментально установлено, что влияние электрических импульсов на функциональное состояние клетки, ткани или органа зависит от формы, длительности и амплитуды импульса, а также ритма их следования. Основные закономерности воздействия следующие:

а) Закон Дюбуа-Реймона - раздражающее действие прямо пропорционально скорости изменения силы тока  $\frac{dI}{dt}$ , т.е. крутизне переднего фронта.

При исследовании влияния электрических импульсов используют понятие пороговых токов. Пороговым током называют минимальное значение силы тока импульса данной формы, которое вызывает раздражение ткани. Опыты показывают, что если исследовать воздействие на ткани импульсов одинаковой формы, но с различными скоростями изменения силы тока, то для импульсов с меньшим значением  $\frac{dI}{dt}$ , пороговое значение силы тока выше. Это свойство называют аккомодацией тканей, т.е. ткани как бы приспосабливаются к медленному возрастанию силы тока. Для изучения аккомодации используют импульсы в форме треугольника или трапеции, крутизну переднего фронта которых изменяют. Способность ткани к аккомодации зависит от ее функционального состояния. Например, при патологических изменениях способность тканей к аккомодации снижается и для воздействия на них более подходящими являются импульсы, сила тока которых изменяется плавно (экспоненциально).

б) Зависимость раздражающего воздействия на ткани от длительности импульса изучают с помощью прямоугольных импульсов. Установлено, что в случае таких импульсов пороговое значение силы тока  $I_n$  обратно пропорционально длительности импульса  $t_u$ .

$$I_n = \frac{a}{t_u} + b. \quad (2)$$

Постоянные  $a$  и  $b$  зависят от ткани и ее функционального состояния.

Рис. 3 показывает, что очень короткие импульсы не оказывают раздражающего воздействия на ткань. Причина этого в

том, что очень короткие импульсы вызывают небольшие смещения ионов — порядка тепловых.

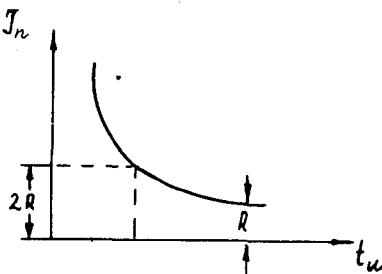


Рис. 3. Зависимость порогового значения силы тока от длительности прямоугольного импульса.

Если импульсы имеют достаточно большую длительность, то их воздействие не зависит от длительности импульса. Соответствующее пороговое значение силы тока называют реобазой ( $R$ ), а удвоенное значение порогового значения — хронаксией ( $chr$ ).

Реобаза и хронаксия характеризуют возбудимость ткани или органа и эти величины используют при оценке ее функционального состояния и в качестве диагностических признаков при повреждениях.

в) Амплитуда силы тока импульса при прохождении через ткань зависит от числа ионов, которые принимают участие в направленном движении под действием электрического поля. Изменяя, при заданных форме и длительности, амплитуду импульса, регулируют степень раздражения ткани в лечебных процедурах.

При измерении импульсных токов (обычными приборами магнито-электрической системы) нужно помнить, что прибор показывает среднее значение силы тока  $J_{cp}$  или напряжения  $U_{cp}$ . Для отыскания амплитудного значения ( $J_m, U_m$ ) следует показание прибора умножить на коэффициент, зависящий от формы импульса. Например, в случае прямоугольной формы импульса:

$$U_{cp} = U_0 \cdot \frac{t_u}{T} \longrightarrow U_0 = Q U_{cp}. \quad (3)$$

Для непосредственного измерения амплитудных значений следует использовать специальные приборы.

г) Физиологические исследования показывают, что реакция ткани оптимальна только в том случае, когда раздражающий стимул повторяется с определенной частотой. Это свойство ткани называют лабильностью или функциональной подвижностью. Для изучения лабильности используют послышки или серии импульсов с различной формой, амплитудой, длительностью и частотой, причем варьируют длительность интервалов времени между сериями (паузы отдыха) и амплитудные значения токов в серии.

Все перечисленные закономерности, связанные с раздражением ткани под воздействием электрического тока, изучает раздел медицины, называемый электродиагностикой. Электродиагностика позволяет оценить функциональное состояние тканей и органов и выявляет оптимальные параметры импульсов тока, применяемых в лечебных процедурах — электростимуляции.

Ниже приводятся только некоторые примеры формы импульсов, используемых в медицине.

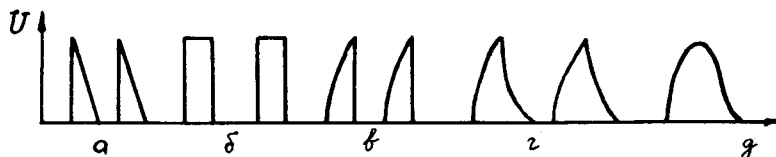


Рис. 4. Лечебные импульсы.

а — тетанические импульсы частотой 100 Гц, вызывают судорожное сокращение; б — прямоугольные импульсы, если  $\frac{t_{\text{имп}}}{t_0} = \frac{1}{9}$ , то такие импульсы оказывают тормозящее действие на кору головного мозга — вызывают электросон; в — экспоненциально нарастающие импульсы; г — экспоненциально нарастающие и спадающие импульсы; д — выпрямленные импульсы почти синусоидальной формы. Если серии импульсов с частотой 50 Гц чередуются с сериями импульсов частотой 100 Гц (так называемые диадинамические или токи Бернара), то такие импульсы оказывают обезболивающее действие.

3. Ряд электрических импульсов можно рассматривать как колебания напряжения или силы тока, которые сильно отличаются от гармонических. Такие колебания называют релаксационными колебаниями, а электрические устройства, создающие их — релаксационными генераторами. Часто для изменения формы импульсов используют дифференцирующие и интегрирующие цепи.

Существенным элементом релаксационных генераторов и дифференцирующих цепей являются цепи, состоящие из резистора с сопротивлением  $R$  и конденсатора емкостью  $C$ , ( $RC$ -цепи).

4. Изучим разрядку конденсатора в  $RC$ -цепи.

Заряд  $q$ , напряжение  $U$  на обкладках и емкость конденсатора связаны выражением

$$U = q/C. \quad (4)$$

При замыкании ключа  $K$  (рис. 5), конденсатор будет разряжаться через резистор  $R$ . В цепи возникает ток, который с течением времени убывает до нуля. От времени зависят как напряжение  $U$ , так и сила тока  $I$ :  $U = U(t)$  и  $I = I(t)$ .

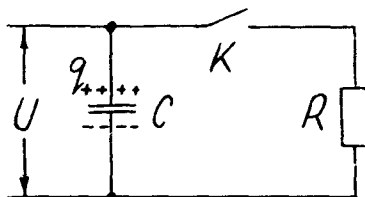


Рис. 5. Разрядка конденсатора через резистор.

Составим дифференциальное уравнение, где неизвестной величиной будет  $U(t)$ . Емкость  $C$  и сопротивление  $R$  считаем постоянными.

Убывание заряда на конденсаторе (т.е. отрицательное приращение  $dq$ ) за элементарное приращение времени  $dt$  пропорционально силе тока в начальный момент времени  $t$  и  $dt$

$$-dq = I(t)dt. \quad (5)$$

Дифференцируя выражение  $U = \frac{q}{C}$ , получим

$$dq = C dU. \quad (6)$$

Согласно закону Ома

$$J = \frac{U}{R}. \quad (7)$$

Подставим (6) и (7) в (5)

$$-C dU = \frac{U}{R} dt. \quad (8)$$

Это и есть искомое уравнение.

Для решения этого уравнения разделим переменные

$$\frac{dU}{U} = -\frac{1}{RC} dt.$$

Затем, интегрируя

$$\int \frac{dU}{U} = -\frac{1}{RC} \int dt,$$

получим  $\ln U = -\frac{1}{RC} t + B$ ,

$B$  — постоянная интегрирования.

Из последнего выражения следует, что

$$U(t) = e^B \cdot e^{-t/RC}. \quad (9)$$

Постоянную  $e^B$  найдем из начальных условий. Обозначим напряжение на конденсаторе до замыкания ключа  $K$  через  $U_0$ . Время будем отсчитывать с момента замыкания ключа. Если  $t = 0$ , то  $U(0) = U_0$  и выражение (9) примет вид

$$U(t) = U_0 e^{-t/RC}. \quad (10)$$

Используя (10), на основании закона Ома можем записать

$$J(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} e^{-t/RC}. \quad (11)$$

Произведение  $RC$  обозначим через  $\tau$ :

$$\tau = RC.$$

$\tau$  называют постоянной времени  $RC$ -цепи. Если  $R$  выражено в омах,  $C$  — в фарадах, то  $\tau$  выразится в секундах.

Рассмотрим формулу (10). Если с начального момента вре-



мени отсчитать интервалы времени, длительность которых кратна целому числу значений  $\tau = RC$ , то справедливы следующие связи:

$$\begin{aligned} U &= U_0 e^{-1} \approx 0,37 U_0 & t &= \tau \\ U &= U_0 e^{-2} \approx 0,13 U_0 & t &= 2\tau \\ U &= U_0 e^{-3} \approx 0,05 U_0 & t &= 3\tau \\ U &= U_0 e^{-4} \approx 0,02 U_0 & t &= 4\tau \\ U &= U_0 e^{-5} \approx 0,007 U_0 & t &= 5\tau \\ U &= 0 & t &\rightarrow \infty \end{aligned}$$

Начиная с любого момента времени, если к нему прибавить интервал времени  $\tau$ , напряжение на конденсаторе убывает в  $e \approx 2,72$  раза.

При разрядке конденсатора через резистор, напряжение на конденсаторе и ток через резистор изменяются так, как показано на рис. 6.

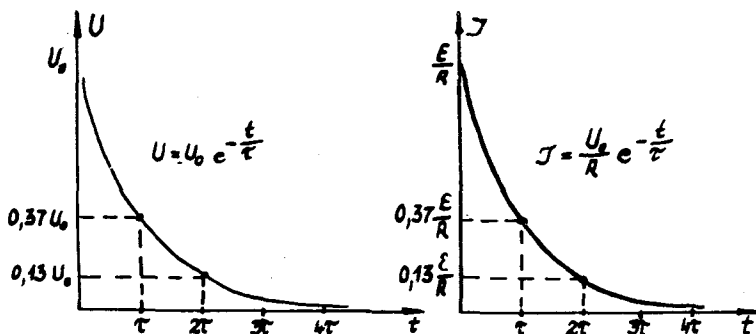


Рис. 6. Изменение  $U$  и  $I$  при разрядке конденсатора через  $R$ .

5. Рассмотрим теперь зарядку конденсатора от источника, э.д.с. которого со временем не изменяется (рис. 7).

При переведении ключа  $K$  из положения 1 в положение 2 напряжение на конденсаторе будет увеличиваться от нуля до

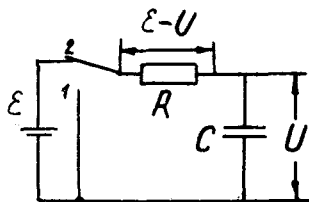


Рис. 7. Зарядка конденсатора через резистор.

значения  $\mathcal{E}$  — э.д.с. источника, т.е.

$$U(t) = \mathcal{E}, \text{ если } t \rightarrow \infty. \quad (I2)$$

В момент времени  $t$  напряжение на конденсаторе равно  $U(t)$ . Напряжение на резисторе соответственно  $\mathcal{E} - U(t)$ . На основании закона Ома

$$J(t) = \frac{\mathcal{E} - U(t)}{R}. \quad (I3)$$

Для нахождения  $U(t)$  составим и решим дифференциальное уравнение.

Приращение  $dq$  заряда на конденсаторе пропорционально силе тока  $J(t)$  и интервалу времени  $dt$ .

$$dq = J(t)dt.$$

Поскольку  $dq = C dU$ , то заменяя  $J(t)$  на выражение (I3), получим

$$C dU = \frac{\mathcal{E} - U}{R} dt. \quad (I4)$$

Разделяем переменные и интегрируем

$$\int \frac{dU}{\mathcal{E} - U} dU = \frac{1}{RC} \int dt,$$

откуда

$$-\ln(\mathcal{E} - U) = \frac{1}{RC} t + D$$

или

$$\ln(\mathcal{E} - U) = -\frac{1}{RC} t - D.$$

Здесь  $D$  - постоянная интегрирования. Освобождаемся от натурального логарифма:

$$\varepsilon - u = e^{-D} \cdot e^{-t/RC} \quad (15)$$

Постоянную  $e^{-D}$  найдем из начальных условий при  $t = 0$ :

$$\varepsilon - u(0) = e^{-D} \cdot e^0 = e^{-D}.$$

Поскольку в этом случае в начальный момент заряд на конденсаторе отсутствует, то  $u(0) = 0$ .

Отсюда следует, что  $e^{-D} = \varepsilon$ .

Из (15) получим

$$\varepsilon - u(t) = \varepsilon \cdot e^{-t/RC},$$

откуда

$$u(t) = \varepsilon (1 - e^{-t/RC}). \quad (16)$$

Подставив в (13) выражение (16), получим формулу для  $J(t)$ :

$$J(t) = \frac{\varepsilon - \varepsilon (1 - e^{-t/RC})}{R},$$

из которой следует

$$J(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-t/RC} \quad (17)$$

При зарядке конденсатора напряжение на конденсаторе и ток через резистор изменяются так, как показано на рис.8.

Обратим внимание на то, что как при разрядке, так и зарядке конденсатора, сила тока убывает экспоненциально (см. 6 и 8).

6. Многие процессы и явления в природе, в производственных и лабораторных условиях, а также в обществе могут оказаться неподходящими для экспериментирования; например, если процессы очень продолжительны во времени, сложны, дорогостоя-

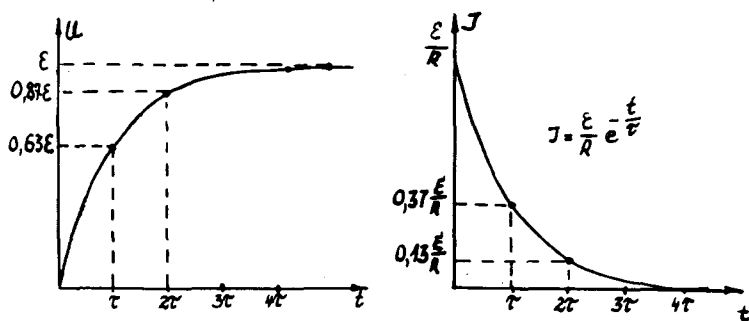


Рис. 8. Изменение  $U$  и  $J$  при зарядке конденсатора.

ящи, не управляемы, опасны и т.д.

В таких случаях вместо объекта изучаются модели. Первым условием пригодности модели является возможность описания объекта и модели одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Широко используются электрические модели, в которых используются линейные (резисторы, конденсаторы, усилители, катушки индуктивности) и нелинейные (диоды, транзисторы, электронные лампы) элементы. Параметры этих элементов и их взаимные структурные связи можно легко изменять в процессе изучения. Это делает модель более гибкой в сравнении с реальным объектом, который предполагалось изучать.

Преимуществом моделей можно считать еще: возможность повторения опыта (без дополнительных затрат), возможность более "чистого" выполнения опыта в сравнении с объектом, поскольку лучше устраняется влияние случайных факторов.

Некоторая группа электронно-вычислительных систем, так называемые аналоговые ЭВМ, и работает по принципу моделирования процессов с помощью электрических цепей. Аналоговые ЭВМ позволяют за короткий промежуток времени решать дифференциальное уравнение или систему уравнений, которые описывают сложные биологические, химические, физические и экономические процессы. Аналоговая ЭВМ, например, используется в биофизической лаборатории ТГУ, где с ее помощью

изучается регуляция кровообращения и дыхания человека.

$RC$ -цепь подходит в качестве модели для процессов, которые можно описать дифференциальными уравнениями типа

$$\frac{dx}{dt} + \frac{1}{\tau} x = f(t), \quad (18)$$

где  $x$  - изучаемая величина,  $f(t)$  - заданная наперед зависимость от времени,  $\tau$  - постоянная времени, которая описывает инерционность какой-то части системы ( $\tau$  - временную инерционность).

В частных случаях  $f(t) = 0$  или  $f(t) = \text{const}$

Сравнивая формулы (8) и (14) с уравнением (18) можно увидеть, что для  $RC$ -цепи значению  $x$  соответствует напряжение,  $\tau = RC$ ,  $f(t) = 0$  (в случае разрядки) и  $f(t) = \frac{\varepsilon}{RC}$  (зарядки конденсатора).

7. Рассмотрим использование  $RC$ -цепи в целях изменения формы импульсов.

Пусть на вход  $RC$ -цепи подаются прямоугольные импульсы и наблюдаются изменения напряжения на конденсаторе (т.е. напряжения на клеммах 1 и 2, рис. 9) и резисторе (на клеммах 2 и 3, рис. 9).

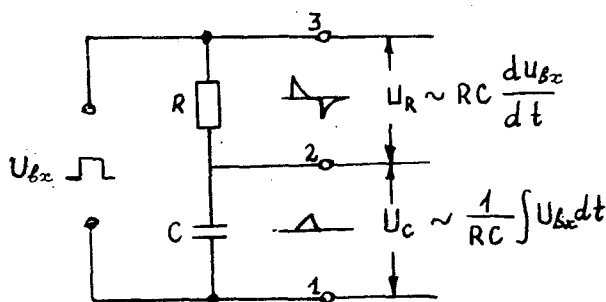


Рис. 9. Использование  $RC$ -цепи в качестве дифференцирующей и интегрирующей цепей.

а) Рассмотрим случай, когда длительность импульса  $t_u$  много больше  $RC$ , т.е.  $t_u \gg RC$  (рис. 10, столбец А). В момент времени  $t_1$  входное напряжение быстро увеличивается до значе-

ния  $U_M$ . Напряжение на конденсаторе  $U_C$  будет увеличиваться экспоненциально во времени (см. рис. 8). Через промежуток времени  $(t_2 - t_1) = 3RC$  напряжение  $U_C$  составит 95 % от значения  $U_M$ . В таком случае говорят, что конденсатор полностью зарядился.

В промежутке  $t_3 - t_2$  напряжение на конденсаторе практически не изменяется.

В момент времени  $t_3$  напряжение на входе резко уменьшается до нуля и конденсатор начнет разряжаться. Напряжение на конденсаторе убывает экспоненциально (см. рис. 6). Через интервал времени  $(t_4 - t_3) = 3RC$  напряжение на конденсаторе составит 5 % от первоначального значения в момент времени  $t_3$ , т.е. конденсатор практически разрядится.

Если выходом  $RC$ -цепи служит конденсатор и регистрируется  $U_C$ , то  $RC$ -цепь используется в качестве интегрирующей цепи. Можно показать, что в этом случае выходное напряжение пропорционально интегралу от входного напряжения.

В случае интегрирующей цепи длительность выходных импульсов больше длительности входных, их амплитуда меньше.

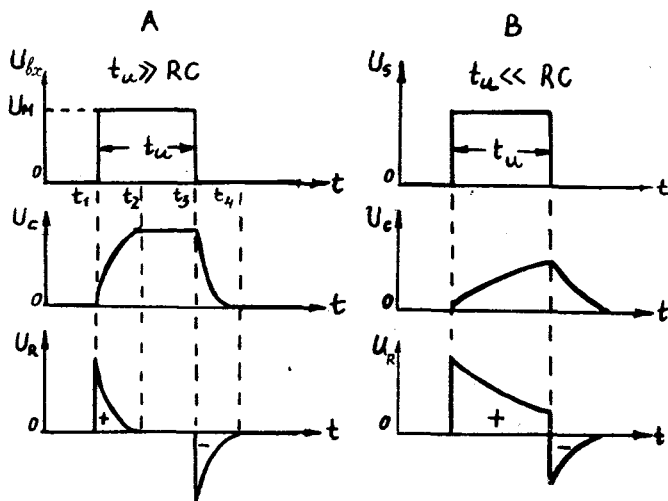


Рис. 10. Напряжение на  $C$  и  $R$  в зависимости от времени, когда на вход  $RC$ -цепи поданы прямоугольные импульсы.

б) Исследуем изменения  $U_R$  на резисторе при условии  $t_u \gg RC$  (рис. 10, столбец А).

В момент времени  $t_1$  конденсатор начнет заряжаться и сила тока  $J$  проходящего через резистор, максимальна. Следовательно, максимально и напряжение  $U_R = JR$  на резисторе.

В интервале времени  $t_2 - t_1$  сила тока зарядки убывает во времени экспоненциально (см. рис. 8). Следовательно, убывает и  $U_R$ .

В интервале времени  $t_3 - t_2$  сила тока зарядки конденсатора практически равна нулю (конденсатор заряжен) и напряжение  $U_R$  на резисторе тоже практически равно нулю.

В интервале  $t_4 - t_3$  конденсатор разряжается. Сила тока разрядки также убывает экспоненциально (см. рис. 6). Следовательно, и  $U_R$  в этом интервале убывает экспоненциально. Поскольку направление тока разрядки противоположно направлению тока зарядки, то и импульс напряжения на резисторе в этом случае имеет противоположную полярность.

Если выходом  $RC$ -цепи служит резистор  $R$ , то цепь используется как дифференцирующая. Можно показать, что в этом случае напряжение на выходе пропорционально производной от входного напряжения. Если на вход  $RC$ -цепи подается прямоугольный импульс, то на выходе возникают два импульса с противоположной полярностью, длительность которых меньше, чем входных импульсов. В столбце В на рис. 10. приведен ряд импульсов на выходе дифференцирующей и интегрирующей цепей для случая  $t_u \ll RC$ . Проанализируйте этот случай самостоятельно, исходя из того факта, что в течение интервала  $t_u$  конденсатор не успевает полностью зарядиться.

8. Импульсы с экспоненциальным фронтом можно еще получить с помощью генератора пилообразного напряжения.

В цепи этого генератора параллельно конденсатору включена газоразрядная лампа (рис. 11).

При зарядке конденсатора через резистор от источника с э.д.с. равной  $\mathcal{E}$ , напряжение на конденсаторе увеличивается экспоненциально (см. формулу (16) и рис. 8):

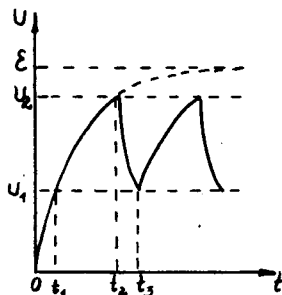
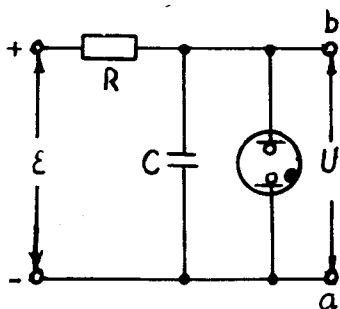


Рис. II. Генератор пилообразного напряжения и зависимость его импульсов от времени.

В отсутствие газонаполненной лампы напряжение на конденсаторе достигло бы значения  $\varepsilon$  (пунктирная линия на графике). Напряжение зажигания  $U_2$  газоразрядной лампы  $N$  выше напряжения гашения  $U_1$ . Как только напряжение на конденсаторе достигает значения  $U_2$ , в лампе возникает газовый разряд. Сопротивление  $r$  лампы резко уменьшается и конденсатор будет разряжаться через нее. При уменьшении напряжения на конденсаторе до напряжения гашения лампы, лампа гаснет и конденсатор вновь будет заряжаться. Лампа зажигается и процесс повторяется снова и снова. Период релаксационных колебаний состоит из интервалов  $t_2 - t_1$  возрастания и  $t_3 - t_2$  - уменьшения напряжения

$$T = (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2).$$

Согласно закону зарядки конденсатора (см. (I6) ) можно получить

$$t_2 - t_1 = RC \ln \frac{\varepsilon - U_1}{\varepsilon - U_2}.$$

Параметры схемы  $\varepsilon$ ,  $R$ ,  $C$ ,  $r$  можно подобрать таким образом, что время разрядки конденсатора много меньше времени зарядки. В таком случае



$$T \approx (t_x - t_1) = RC \cdot \ln \frac{\varepsilon - U_1}{\varepsilon - U_2}. \quad (19)$$

9. Прямоугольные импульсы можно получить при помощи мультивибратора.

Мультивибратор состоит из двух усилительных каскадов. Выход каждого каскада через конденсатор соединен с входом другого каскада. Усилительными элементами могут быть электронные лампы или транзисторы. Если усилительные элементы, сопротивления и емкости в обоих каскадах одинаковы, то это симметричный мультивибратор. Если хотя бы один из соответствующих элементов не равен другому, то мультивибратор асимметричный.

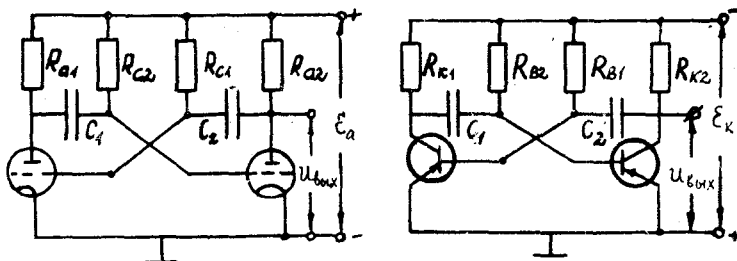


Рис. 12. Схемы мультивибраторов.  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_x$  — напряжения источников питания,  $U_{вых}$  — выходное напряжение.

Процессы, происходящие в мультивибраторе, описаны в [2]. Как о транзисторном так и ламповом мультивибраторе можно сказать следующее.

В мультивибраторе имеются два усилительных элемента, которые по-очереди запираются (т.е. не проводят ток) и открываются (т.е. проводят ток). Эти состояния определяются временем зарядки и перезарядки конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . На выходе мультивибратора возникают прямоугольные импульсы.

Длительности импульса и паузы между двумя импульсами

зависят от значений произведения сопротивления на емкость в плечах мультивибратора. В случае симметричного мультивибратора длительности импульса и паузы равны между собой. Для асимметричного импульса эти величины неодинаковы.

Для лампового мультивибратора:

$$T = t_u + t_o \approx 2R_{C_1} \cdot C_2 + 2R_{C_2} \cdot C_1. \quad (20)$$

Для транзисторного мультивибратора:

$$T = t_u + t_o \approx 0,7R_{b1} \cdot C_2 + 0,7R_{b2} \cdot C_1. \quad (21)$$

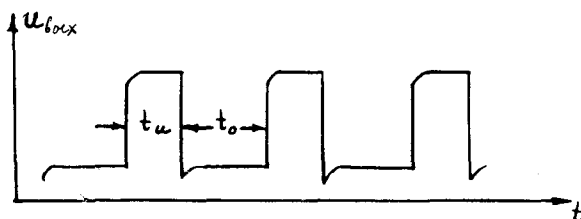


Рис. 13. Выходное напряжение на выходе асимметричного мультивибратора.

## Ход работы

Изучение генератора пилообразного напряжения.

Включите осциллограф в сеть на прогревание (0,5 часа).

За это время ознакомьтесь с методикой проведения измерений и проделайте предварительные опыты.

I. Соберите цепь. Для этого подключите напряжение от источника постоянного напряжения к входу генератора. Входной кабель осциллографа подсоедините к выходу генератора: "-"-провод осциллографа к клемме "а" генератора, "+"-провод к клемме "б" (см. рис. II).

На входе используемого в работе осциллографа используется внешний предварительный делитель напряжения, который уменьшает входное напряжение в 10 раз. Внешний делитель напряжения имеет большое входное сопротивление (10 МОм) и небольшую (10 пФ) емкость, включенную параллельно сопротивле-

нию. Для различных осциллографов входные емкости и сопротивления, а также коэффициент деления потенциометра могут быть различными. Такие свойства делителя позволяют исследовать зависимость напряжения на экране осциллографа без искажений.

На лицевой панели осциллографа имеется переключатель, позволяющий работать в режимах открытого и закрытого входов. Тип режима определяют схемы, приведенные рядом с переключателем.

В случае закрытого режима постоянный компонент входного сигнала в осциллограф не попадает. В данной работе следует использовать открытый вход, в случае которого постоянный компонент тоже наблюдается.

2. Стенд с генератором пилообразного напряжения позволяет выбрать различные комбинации резисторов и конденсаторов.

Выбрав любую комбинацию  $R$  и  $C$  и включив питание генератора, получите на экране осциллографа развертку сигнала во времени. Для этого нужно подобрать: подходящие чувствительность  $y$ -оси, а также частоту генератора развертки и амплитуду синхронизации (так, чтобы на экране были видны 2 - 3 импульса наблюдаемого сигнала). Вместе с преподавателем выясните, как можно измерить амплитуду и длительность импульса.

Для выполнения этой работы необходимо использовать осциллографы с калиброванными входами.

3. Исследуйте зависимость периода  $T$  пилообразного напряжения от величины постоянной времени схемы, по крайней мере для четырех комбинаций  $RC$ . Значения  $R$  и  $C$  приведены на стенде. Значения  $T$  измерьте с помощью осциллографа. Результаты занесите в таблицу I.

Таблица I

$R (Ом)$	$C (ф)$	$\tau = RC (с)$	$T (с)$
...	...	...	...

На основании табличных данных постройте график зависимости периода  $T$  от постоянной  $\tau$ .  $T$  и  $\tau$  удобно вырезать в долях секунды (например, мс, мкс).

4. Для одной или двух комбинаций  $RC$  определите постоянную времени  $\tau$  из опыта.

На основании закона зарядки конденсатора (см. (16)), можно показать, что, через интервал  $\Delta t$  с момента гашения лампы, верно выражение

$$\ln K = \frac{1}{RC} \Delta t,$$

где

$$K = \frac{\mathcal{E} - U_1}{\mathcal{E} - U(t_3 + \Delta t)}. \quad (22)$$

Здесь  $\mathcal{E}$  — э.д.с. источника питания,  $U_1$  — напряжение гашения лампы и  $U(t_3 + \Delta t)$  — напряжение на конденсаторе в момент времени  $(t_3 + \Delta t)$ .

Формула (22) показывает, что  $\ln K$  зависит линейно от значения  $1/\tau$ .

В этой части работы следует измерить как значения  $\mathcal{E}$  и  $U_1$ , так и  $U(t_3 + \Delta t_i)$  для разных интервалов времени  $\Delta t_i$ .

Измерения желательно провести следующим образом:

а) Отсоедините генератор от источника питания. Соедините клемму "-" осциллографа с клеммой "-" источника питания, клемму "+" не подсоединяйте. Ручкой смещения  $y$ -оси установите линию развертки на экране осциллографа, соответствующую потенциалу клеммы "-" генератора, на 25–30 мм ниже центра экрана  $O$  (см. положение А на рис. 14). Запишите длину  $L_{AO}$  вертикального отрезка прямой, соответствующую положению А.

Соедините клемму "+" источника питания с клеммой "+" осциллографа. Отрегулируйте усиление по  $y$ -оси так, чтобы светящаяся линия была на 25 – 30 мм выше центра экрана (положение В, рис. 14). Измерьте длину  $L_{OB}$  отрезка  $OB$  и найдите длину отрезка  $AB$ :

$$L_{AB} = L_{AO} + L_{OB}.$$

Значение  $L_{AB}$  умножьте на чувствительность\*  $y$  -входа, это и будет  $\mathcal{E}$  - э.д.с. источника.

б) Оставьте чувствительность  $y$  -входа и положение ручки "смещение" без изменения.

Соедините источник питания вновь с генератором, а выход генератора с осциллографом, как это было описано ранее (п. I). Выберите какую либо комбинацию значений  $R$  и  $C$  и отрегулируйте развертку так, чтобы на экране был виден период импульсного напряжения.

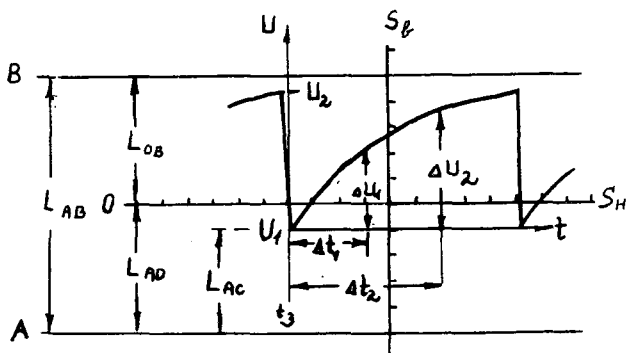


Рис. I4. Определение значений  $\mathcal{E}$ ,  $U_1$  и  $U(t_3 + \Delta t)$  с экрана осциллографа.

$S_V$  и  $S_H$  - вертикальная и горизонтальная шкалы экрана.

Измерьте длину отрезка  $L_{AC}$  (см. рис. I4), умножьте на чувствительность  $y$  -входа, получите значение  $U_1$  - напряжения гашения лампы. Аналогично определите напряжение  $U_2$  зажигания лампы.

в) Отрегулируйте осциллограф, так чтобы изображение одного периода было в центре экрана и его размеры составляли примерно 2/3 размеров экрана в вертикальном и горизонталь-

\* Под чувствительностью здесь понимают значение напряжения, которое вызывает смещение луча на экране на единицу длины. Соответствующие единицы измерения  $\frac{B}{CM}$  или  $\frac{B}{MM}$ .

ном направлениях. В случае необходимости можно изменить чувствительность  $y$ -оси. Скопируйте по возможности точнее один период напряжения с экрана на кальку. Этот рисунок приклейте на миллиметровую бумагу, припишите значения  $R$ ,  $C$ ,  $\varepsilon$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ , а также чувствительности  $y$ - и  $x$ -входов.\*

Нанесите на рисунок оси времени и напряжения (см. рис.14), а также масштаб соответственно чувствительностям  $y$ - и  $x$ -входов.

г) Измерьте, по крайней мере, 6 - 7 интервалов  $\Delta t_i$  (1, 2, 3...7) на протяжении одного периода и соответствующие им приращения напряжения  $\Delta U_i$  относительно напряжения  $U_1$  гашения лампы. На основании формулы (22) вычислите значения  $K$  и  $\ln K$ , соответствующие каждому  $\Delta t_i$ . Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$\varepsilon = \dots, U_2 = \dots$ , вычисленное $\tau = \dots$ , определенное по графику $\tau = \dots$				
$\Delta t_i$ (мс)	$\Delta U_i$ (В)	$U(t_3 + \Delta t_i)$ , В	$K$	$\ln K$
...	...	...	...	...

На основании результатов постройте график: по вертикальной оси отложите значения  $\ln K$ , по горизонтальной оси - значения  $\Delta t_i$ .

Если  $\Delta t_i$  равно периоду  $T$ , то на основании графика можете найти величину  $(\varepsilon - U_1) \cdot (\varepsilon - U_2)$ , характеризующую данную опытную установку. Эту же величину можно вычислить используя график, составленный в пункте 3 и значения  $\varepsilon$ ,  $U_1$  и  $U_2$ , измеренные с помощью осциллографа. Сравните

\* Под чувствительностью  $x$ -входа здесь понимаем то время, которое необходимо на смещение луча в горизонтальном направлении на единицу длины ( $\frac{\text{мс}}{\text{см}}$ ,  $\frac{\text{мкс}}{\text{см}}$ ).

разным путем полученные значения  $(\varepsilon - u_1) \cdot (\varepsilon - u_2)$  между собой. Это позволит проанализировать погрешность измерений.

Исследование дифференцирующей и интегрирующей цепей.

В данной работе мультивибратором служит интегральная схема, емкости  $C_1$  и  $C_2$  в плечах которой, равны (см. рис. 12 и формулу (21)). С помощью переключателя можно изменять значения этих емкостей.

Подсоедините мультивибратор к осциллографу и определите длительность прямоугольных импульсов  $t_u$ , период  $T$ , скважность  $Q$  и амплитудные значения напряжения. Для симметричного мультивибратора на полупроводниках  $T \approx 1,4 RC$ . Определите значения постоянной времени для различных положений переключателя. Для этого постройте график, на вертикальную и горизонтальную оси нанесите масштаб времени. График — прямая с наклоном  $1/4$ . На вертикальную ось нанесите значения периодов, определенные экспериментально. Используя прямую, по горизонтальной оси найдите значения постоянной времени.

2. Для какого-либо положения выключателя скопируйте выходной импульс с экрана на кальку. Далее используйте это положение переключателя для изучения  $RC$ -цепей.

Соедините выход мультивибратора с  $RC$ -цепью. К  $y$ -входу осциллографа подключите  $RC$ -цепь, так чтобы она работала как дифференцирующая цепь (см. рис. 9). Соответствующим переключателем измените постоянные времени цепи, вычислите их значения и зарисуйте с экрана соответствующие выходные импульсы. Не изменяйте в течение 1 и 2 пунктов значений чувствительности  $y$ - и  $x$ -входов!

Аналогичные измерения проведите для интегрирующей цепи.

Все рисунки на кальке наклейте на один лист, так чтобы рисунки относящиеся к одной и той же схеме, располагались друг под другом, начальные моменты импульсов располагались на одной вертикальной прямой. На каждом рисунке отметьте длительность  $t_u$  входного прямоугольного импульса и отношение  $\frac{t_u}{T}$ . Если чувствительность  $y$ - и  $x$ -входов оставались постоянными, то непосредственно можно увидеть, как изменяется форма импульсов, амплитуда и длительность в зависи-

мости от отношения  $\frac{t_u}{RC}$ .

По окончании опытов выключите мультивибратор.

## Вопросы

1. Чему равна скважность  $Q$  исследуемого мультивибратора? Как можно изменить  $Q$ ?

2. Что называют электродиагностикой?

3. Как превратить выходное напряжение дифференцирующей цепи в импульс постоянной полярности?

4. Перечислите способы применения прямоугольных импульсов в медицине.

5. Изменится ли форма импульсов при прохождении через участок тела пациента?

6. В чем заключается метод хронаксии?

7. Какие преимущества имеют транзисторы в сравнении с электронными лампами?

8. Какие преимущества имеют интегральные схемы в сравнении с обычными транзисторными схемами?

9. Что называют реобазой?

10. Какое значение (амплитудное, эффективное или среднее) силы тока измеряет магнитно-электрический прибор, включенный в цепь импульсного тока?

11. Что называют "постоянной составляющей" силы тока?

12. Получите формулу (22).

## Литература

1. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики. М., "Высшая школа", 1982, с. 273-279.
2. Н.М. Дивенцев. Курс физики, II. М., "Высшая школа", 1978, с. 150-160.



## ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ПРИНЦИПАМИ ЭКГ

### Задание

На модели сердца, изменяя величину и направление токового диполя, измерить соответствующие напряжения в двух отведениях треугольника Эйнтовена. По данным опыта зарисовать  $QRS$ -цикл в I и II отведениях и определить местоположение среднего электрического вектора сердца.

### Принадлежности

Источник постоянного напряжения, миллиамперметр, вольтметр, переключатель, пантограф, ванна с водой, провода.

### Введение

Во время работы мышцы сердца (миокарда) в организме возникает электрическое поле. При регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) к телу человека прикрепляются электроды (см. рис. 1) и измеряются изменения разностей потенциалов электрического поля сердца со временем между различными точками поверхности тела.

На практике для измерения потенциалов точек  $R$ ,  $L$  и  $F$  электроды крепятся соответственно к правой руке (ПР), левой руке (ЛР) и левой ноге (ЛН). При этом предполагается, что точки  $R$  и ПР,  $L$  и ЛР, а также  $F$  и ЛН эквипотенциальны. Часто электрокардиограмму регистрируют используя точки, указанные в табл. I.

ЭКГ, полученные посредством различных подключений, в зависимости от состояния здоровья и особенностей организма могут отличаться друг от друга. На рис. 2 показана типичная

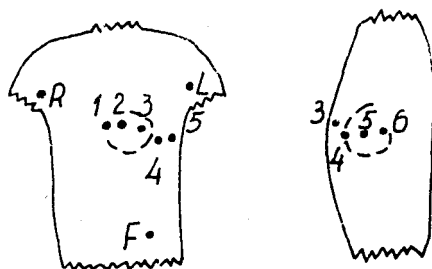


Рис. I. Точки на поверхности тела, между которыми измеряются разности потенциалов. Пунктиром показаны частично очертания сердца.

Таблица I

Обозначение отведения	Точки, между которыми измеряется изменение разности потенциалов со временем
I	$L$ и $R$ , т.е. ЛР и ПР
II	$R$ и $F$ , т.е. ПР и ЛН
III	$L$ и $F$ , т.е. ЛР и ЛН
$aVR$	между точкой $R$ и закороченными точками $L$ и $F$
$aVL$	точкой $L$ и закороченными точками $R$ и $F$
$aVF$	точкой $F$ и закороченными точками $R$ и $L$
$V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$	соответственно между точками I, 2, 3, 4, 5 или 6 и закороченными точками $R, L, F$

ЭКГ, получаемая при подключении II.

Электрическую активность сердца объясняют следующим образом. В момент покоя заряд на поверхности мышечных волокон сердца положителен. Это обуславливается различной концентрацией ионов  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Cl^-$  и др. внутри и вне клеток.

При распространении возбуждения по нервно-мышечной системе сердца, проницаемости мембран изменяются. Концентрации ионов вне и внутри клетки перераспределяются таким образом,

что поверхности мышечных волокон, охваченных возбуждением, отрицательнее областей покоя. Эта картина объемна в пределах сердца.

Деполяризованные (с отрицательным зарядом) области и реполяризованные области покоя (с положительным зарядом) образуют систему зарядов, которую в любой момент времени можно рассматривать как совокупность генераторов тока.

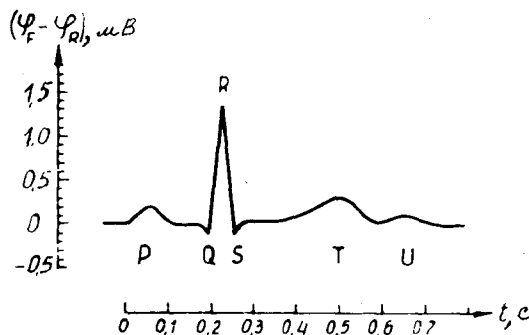


Рис. 2. Электрокардиограмма.  $t$  — время в секундах;  $(\psi_F - \psi_R)$  — разность потенциалов точек  $F$  и  $R$  в милливольтах.

Простейшим генератором тока является токовый диполь. Токовым диполем называют систему из двух разноименных полюсов (см. рис. 3).

Токовый диполь характеризуют вектором дипольного момента  $\vec{D}$ , который имеет следующее определение: вектор начинается на отрицательном полюсе и направлен к положительному полюсу, его модуль равен

$$D = J\ell, \quad (I)$$

где  $J$  — сила тока в диполе, а  $\ell$  — расстояние между полюсами.

Эквивалентная схема токового диполя в проводящей среде показана на рис. 4.

Внутреннее сопротивление  $R$  генератора много больше сопротивления внешней среды  $R_0$ . В этом случае можно пока-

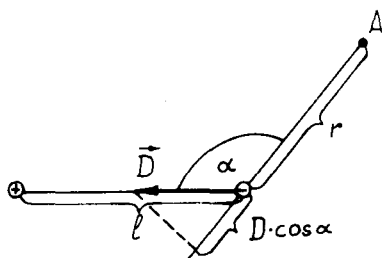


Рис. 3. Токовый диполь.  $l$  — расстояние между полюсами;  $\vec{D}$  — вектор дипольного момента;  $r$  — расстояние от начала вектора  $\vec{D}$  до точки  $A$ , где регистрируется потенциал;  $\alpha$  — угол между вектором и направлением наблюдения;  $D \cos \alpha$  — проекция вектора  $\vec{D}$  на направление наблюдения.

звать, что

$$J = J_0 \approx \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (2)$$

т.е. сила тока в генераторе и суммарная сила тока во внешней среде не зависят от сопротивления внешней среды.

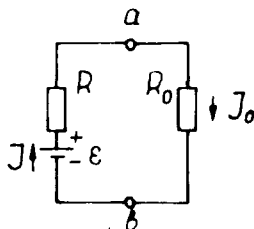


Рис. 4. Токовый генератор, эквивалентный токовому диполю.  $R$  — внутреннее сопротивление генератора;  $R_0$  — внешнее сопротивление,  $\mathcal{E}$  — э.д.с.;  $a$  и  $b$  — полюсы генератора. Стрелками показаны направления токов в генераторе и внешней среде.

В соответствующей теории показывается, что потенциал точки  $A$  токового диполя, находящегося в неограниченно про-

водящей среде (см. рис. 3), при условии, что  $r > \ell$  (т.е. расстояние (•)  $A$  от диполя значительно больше расстояния между полюсами), описывается выражением:

$$\varphi = \frac{\rho}{4\pi r^2} J \ell \cos \alpha + \frac{\rho}{8\pi r^3} J \ell^2 (3 \cos \alpha - 1) + G \quad (3)$$

Здесь:  $\rho$  — удельное сопротивление среды. Через  $G$  обозначена сумма членов, которые пропорциональны выражениям

$\frac{\ell}{r^4}$ ,  $\frac{\ell}{r^5}$  и т.д. Представление потенциала диполя в виде формулы (3) называют мультипольным разложением в ряд.

В теоретическом описании электрического поля сердца используются различные модели. Например, если рассматривается электрическое поле вблизи сердца, то предполагается, что в состоянии возбуждения можно рассматривать сердце как совокупность электрических квадруполов или октаполов, значение потенциала квадрупольно пропорционально  $1/r^3$ , октапольно —  $1/r^4$ . Поэтому соответствующие члены формулы (3) называют квадрупольным или октапольным потенциалами.

Модель, в которой потенциал электрического поля сердца описывается формулой (3), называют мультипольным электрическим эквивалент-генератором сердца.

Ниже рассмотрим подробнее дипольные модели.

В состоянии возбуждения в миокарде имеется много диполей. В процессе распространения возбуждения в каждый момент возникают новые и исчезают старые диполи. Если исследуются потенциалы на значительном расстоянии от сердца, так что выполняется условие  $r \gg \ell$  (см. рис. 3), то первый член в формуле (3) много больше остальных. Поэтому их можно не учитывать, а потенциал представить в виде:

$$\varphi = \frac{\rho}{4\pi r^2} J \ell \cos \alpha = \frac{\rho}{4\pi r^2} D \cos \alpha, \quad (4)$$

где  $D \cos \alpha$  — проекция вектора  $\vec{D}$  на прямую, соединяющую начало вектора с точкой, где потенциал измеряется — направление наблюдения.

Предположим теперь, что в момент времени  $t$  рабочего

цикла сердце имеет  $m$  диполей. Для нахождения потенциала их суммарного поля можно использовать принцип суперпозиции электрических полей. Потенциал совокупности диполей равен алгебраической сумме потенциалов отдельных полей диполей в данной точке

$$\varphi_s = \frac{q}{4\pi\epsilon^2} \sum_{j=1}^m D_j \cos \alpha_j, \quad (5)$$

где  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ ,  $D_j \cos \alpha_j$  - проекция вектора дипольного момента  $\vec{D}_j$  диполя с номером  $j$  на направление наблюдения,  $\epsilon$  - общее расстояние всех диполей до точки наблюдения.

Модели, в которых электрические характеристики сердца описываются большой совокупностью токовых диполей, называют полидипольными электрическими эквивалент-генераторами. Эти модели используются при теоретическом расчете ЭКГ.

Для теоретического обоснования электрокардиографии на практике, однако, используют несколько иную модель. Сумму проекций дипольных моментов в выражении (5) можно рассматривать как проекцию дипольного момента  $\vec{D}_s$  одного эквивалентного токового диполя

$$\vec{D}_s = \sum_{j=1}^m \vec{D}_j \quad (6)$$

Потенциал электрического поля сердца тогда выразится

$$\varphi_s = \frac{q}{4\pi\epsilon^2} D_s \cos \alpha_s, \quad (7)$$

где  $\alpha_s$  - угол между вектором  $\vec{D}_s$  и направлением на точку регистрации.  $D_s$  - модуль вектора  $\vec{D}_s$ .

Модель, в которой электрическая активность сердца описывается с использованием одного эквивалентного диполя и потенциал характеризуется формулой (7), называют дипольным электрическим эквивалент-генератором сердца.

Выражение (7) получено в предположении, что сердце находится в неограниченной проводящей среде. Фактически же сердце функционирует в среде, ограниченной поверхностью тела.

Тем не менее можно показать, что ограниченность среды несколько изменяет численное значение потенциала (7), но его зависимость от угла  $\alpha_s$  и расстояния  $z$  не изменяется.

В дальнейшем всегда будем предполагать, что сердцу можно сопоставить дипольный электрический эквивалент-генератор.

Результирующий вектор дипольного момента  $\vec{D}_s$  называют интегральным электрическим вектором (ИЭВ) или просто электрическим вектором (ЭВ) миокарда сердца. В течение цикла работы сердца в каждый момент времени величина и направление ИЭВ изменяются определенным образом, что отражает распространение возбуждения в миокарде.

Изменение величины и направление ЭВ сердца исследуют в векторной электрокардиографии (ВЭКГ). При этом исследуют зависимость разности потенциалов между определенными точками поверхности тела от времени, находят соответствующие расстояния и углы  $\alpha_s$  и конструируют траекторию конца вектора  $\vec{D}_s$  в трехмерном пространстве (объемная ВЭКГ) или в какой-либо плоскости (плоская ВЭКГ). С помощью ВЭКГ, например, установлено, что максимальное численное значение модуля ЭВ составляет примерно  $2 \cdot 10^{-5}$  А·м.

Ознакомимся с получением плоской ВЭКГ более подробно. Для получения ВЭКГ выработано несколько систем отведений, которые отличаются по числу электродов и расположению их на поверхности тела. Например, ВЭКГ можно получить, если на горизонтальные пластины подходящего осциллографа подадим напряжение между точками  $R$  и  $L$  (I отведение), на вертикальные же — напряжение между точками  $F$  и  $L$  (III отведение по табл. I и рис. I).

Плоские ВЭКГ анализируются в декартовой системе координат, начало которой помещают в геометрический центр желудочков сердца. Оси направляют следующим образом —  $x$ -ось справа налево,  $y$ -ось сверху вниз,  $z$  — от наблюдателя (см. рис. 5).

Оси координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  определяют горизонтальную ( $xz$ ), фронтальную — ( $xy$ ) и сагиттальную ( $yz$ ) плоскости. Предположим теперь, что проекцией ЭВ сердца на фронтальную плоскость будет вектор  $\vec{D}$  и начало  $O$  этого

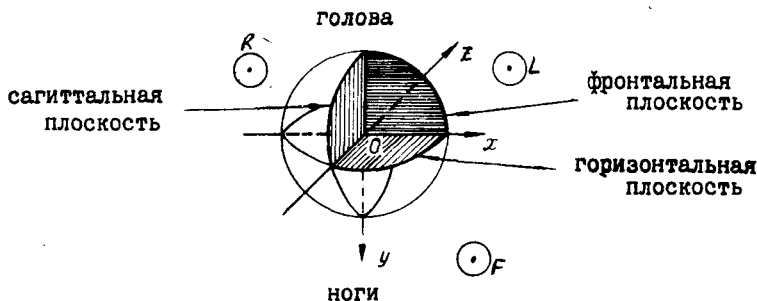


Рис. 5. Система координат, используемая при анализе ВЭКГ.  $O$  — геометрический центр желудочков сердца. Для более наглядного пространственного представления приблизительно (т.е. не в масштабе) показано расположение точек  $R$ ,  $L$  и  $F$  (см. рис. 1). Сердце изображено в виде шара.

вектора находится на одинаковом расстоянии  $z$  от точек  $R$  и  $L$ , находящихся также на фронтальной плоскости (см.рис. 7).

На основании формулы (7)

$$\varphi_R - \varphi_L = \frac{\rho \sin \beta / 2}{2\pi z^2} D (\cos \alpha_R - \cos \alpha_L). \quad (8)$$

Учитывая тригонометрические соотношения между углами  $\alpha_R$ ,  $\alpha_L$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  можно показать, что

$$\varphi_R - \varphi_L = \frac{\rho \sin \beta / 2}{2\pi z^2} D \cos \alpha. \quad (9)$$

где  $D \cos \alpha$  — проекция вектора  $\vec{D}$  на прямую, проведенную через точки  $R$  и  $L$ . Отсюда видно, что разность потенциалов  $\varphi_R - \varphi_L$  между точками  $R$  и  $L$  пропорциональна проекции вектора  $\vec{D}$  на прямую, проходящую через эти точки.

В электрокардиографии с использованием стандартных подключений I, II и III измеряют разности потенциалов (напряжение) между точками  $R$ ,  $L$ ,  $F$  фронтальной плоскости, находящимися в вершинах равностороннего треугольника (или между точками, эквипотенциальными с  $R$ ,  $L$  и  $F$  (ПР, ЛР,



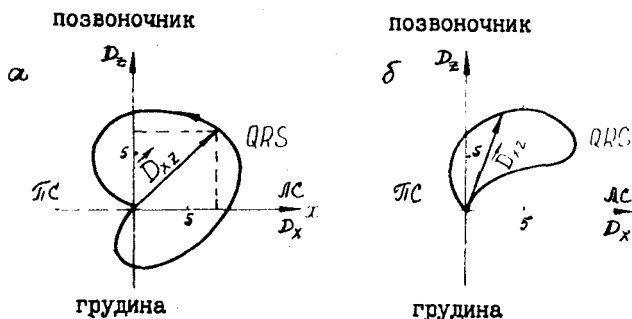


Рис. 6. Траектория конца ЭВ сердца в течение комплекса  $QRS$ , (см. рис. 2), спроецированная на горизонтальную плоскость.  $\alpha$  - здорового человека,  $\delta$  - при инфаркте миокарда.  $D_{xz}$  - проекции ЭВ сердца на горизонтальную плоскость;  $D_z$  и  $D_x$  - проекции ЭВ сердца на оси  $z$  и  $x$  (измеряют в А·м). Стрелка на траектории указывает направление вращения вектора  $D_{xz}$ . ПС-правая, ЛС-левая сторона.

ЛН по рис. 8).

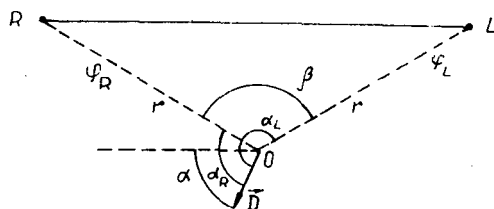


Рис. 7. Проекция вектора  $\vec{D}$  на фронтальную плоскость.  $\varphi_R$  и  $\varphi_L$  - потенциалы токового диполя  $\vec{D}$  на этой плоскости в точках  $R$  и  $L$ .

В течение одного цикла проекция вектора сердца на фронтальную плоскость изменяется примерно таким образом, как показано на рис. 9.

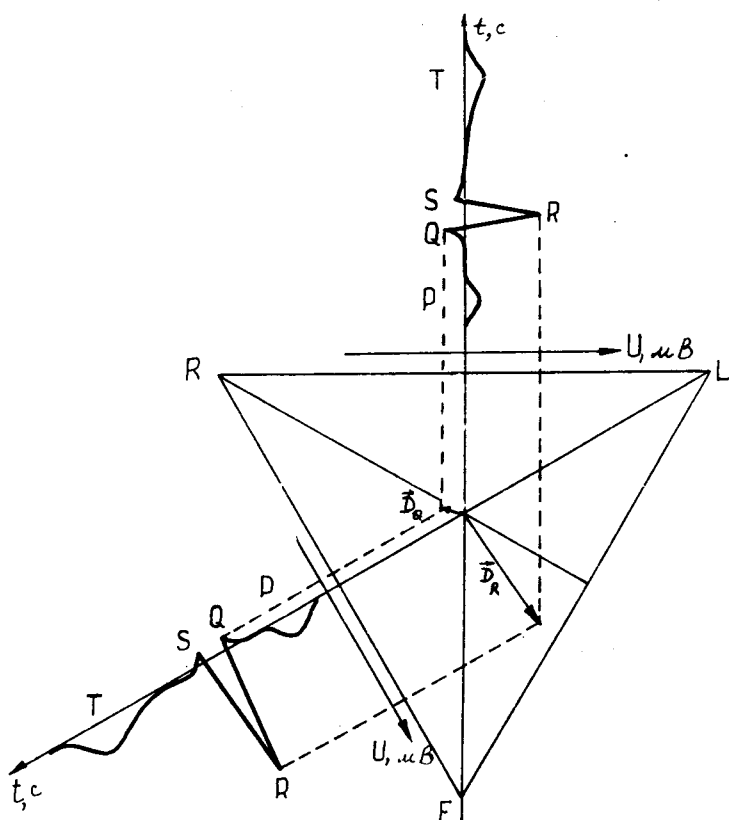


Рис. 8. Треугольник Эйнтховена. Вектор  $D_R$  — проекция ЭВ сердца на фронтальную плоскость в момент времени  $t_R$ , что соответствует зубцу R на ЭКГ I и II подключений.  $D_Q$  соответствует Q-зубцу в момент  $t_Q$ .

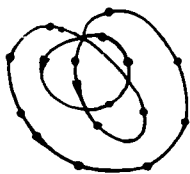


Рис. 9. Векторная кардиограмма на фронтальной плоскости.

## Ход работы

Схема опыта приведена на рис. 10.

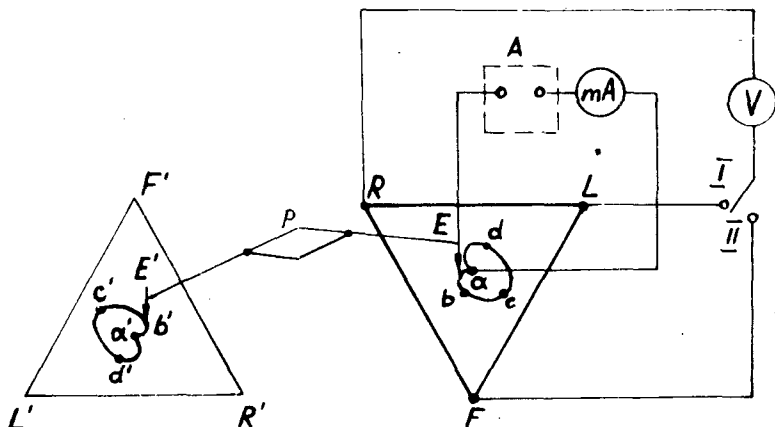


Рис. 10. Схема опыта.

В центре равностороннего треугольника  $RLF$  (в ванне) укреплен контакт "а", соединенный с отрицательным полюсом источника  $A$  постоянного напряжения. С положительным полюсом источника соединен подвижный электрод  $E$ , который можно перемещать с помощью пантиграфа.

На столе пантиграфа в центре треугольника  $R'L'F'$  размещена замкнутая линия  $a'b'c'd'$ , которая описывает проекцию траектории конца электрического вектора сердца на фронтальную плоскость в течение цикла  $QRS$ . На этой линии отмечены 13 точек в виде углублений. При перемещении острья  $E$  по этим точкам электрод  $E$  в ванне описывает линию  $abcd$ .

Между контактом "а" и электродом  $E$  возникает токовый диполь, величина и направление которого зависят от того в какой точке кривой  $abcd$  находится электрод  $E$ . Силу тока в диполе измеряют миллиамперметром (мА), регулируют изменением напряжения источника.

Токовый диполь создает электрическое поле в проводящей

среде (воде). Напряжение между точками  $R$  и  $F$  (II отведение) измеряют вольтметром  $V$ .

### Последовательность измерений.

1. Уберите электрод  $E$  из плеча пантографа. Поместите острие  $E$  в точки  $R$ ,  $L$ ,  $F$  и  $a$  и убедитесь в том, что отверстие, в котором ранее был электрод  $E$ , размещается точно над точками  $R$ ,  $L$ ,  $F$  и  $a$ . Если этого не происходит, следует отрегулировать схему вместе с преподавателем.

После проверки схемы закрепите электрод  $E$  вновь в плечо пантографа, так чтобы конец его углублялся в воду на 2 - 3 мм. Проверьте не препятствуют ли провода продвижению электрода по линии  $abcd$ .

2. Включите источник напряжения  $A$  и цифровой вольтметр  $V$ . Острие  $E'$  поместите в точку I на кривой  $a'b'c'd'$ . Регулируя напряжение источника, установите силу тока равной 5 мА (обратите внимание на пределы миллиамперметра!). Такая постоянная сила тока должна сохраняться в течение всего эксперимента.

С помощью ключа  $K$  вольтметр можно подключить или на I отведение ( $U_I$ ) или на отведение II ( $U_{II}$ ).

Перемещая острие  $E'$  в следующие точки (2, 3, 4...I3) измерьте напряжения  $U_I$  и  $U_{II}$  для всех I3 положений, каждый раз проверяя постоянство силы тока.

Данные занесите в таблицу 2 вместе со знаком.

Таблица 2

Положение острия	$U_I$ (В)			$U_{II}$ (В)		
	I	2	3	I	2	3
I						
2						
3						
...						
I3						

Опыт повторите дважды, обходя контур  $a'b'c'd'$  в противоположных направлениях. Средние значения занесите в 3-ий столбец.

Оформление данных.

I. Постройте зависимость напряжений  $U_I$  и  $U_{II}$  от положения электрода  $E$  на кривой  $abcd$  (см. рис. II).

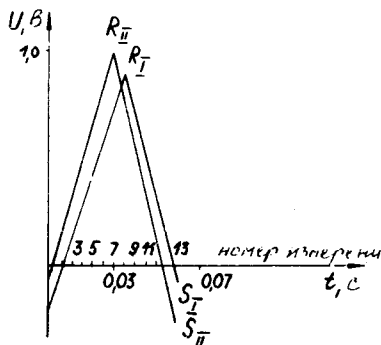


Рис. II. Зубец  $QRS$ .

Точки I – 13 помещены на кривой  $ab'c'd'$  с таким расчетом, что расстояние между каждой парой точек соответствует равным промежуткам времени. Весь  $QRS$  цикл конца электрического вектора сердца проходит за 0,063 секунды.

Отложите по горизонтальной оси на одинаковых расстояниях (5 мм) 13 точек. В шкале времени расстоянию между двумя соседними точками соответствует 0,005 с.

На вертикальную ось нанесите напряжения  $U_I$  и  $U_{II}$ ; максимальному напряжению должно соответствовать примерно 10 см.

2. Нахождение местоположения среднего электрического вектора сердца.

В медицине для оценки состояния сердца используют так называемый средний электрический вектор сердца. Его определяют для промежутка времени, в течение которого происходит деполяризация желудочков сердца. Таким образом можно этот вектор найти по  $QRS$  циклу.

Вершинам  $Q, R, S$  зубца  $QRS$  для I и II отведений соответствуют напряжения  $u_I^Q, u_I^R, u_I^S$  и  $u_{II}^Q, u_{II}^R, u_{II}^S$ . Сложите их вначале алгебраически по правилу

$$\bar{u}_I = u_I^R - (u_I^Q + u_I^S)$$

$$\bar{u}_{II} = u_{II}^R - (u_{II}^Q + u_{II}^S)$$

Далее отложите значения  $\bar{u}_I$  и  $\bar{u}_{II}$  на сторонах равностороннего треугольника так, как показано на рис. 12 и найдите положение вектора  $\vec{D}$  (напряжения  $\bar{u}_I$  и  $\bar{u}_{II}$  пропорциональны проекциям вектора  $\vec{D}$  на соответствующие стороны).

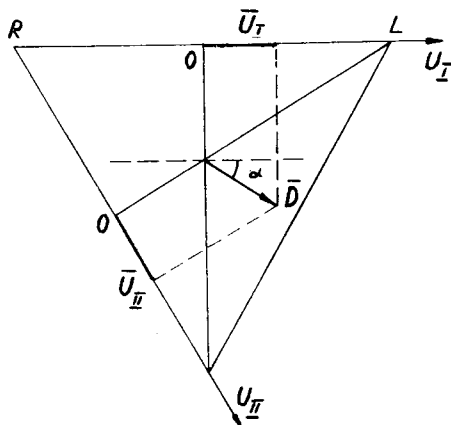


Рис. 12. Нахождение вектора сердца.

Измерьте угол  $\alpha$  между вектором  $\vec{D}$  и прямой, параллельной стороне  $RL$  треугольника. Положение сердца в грудной клетке считается нормальным, если значение  $\alpha$  лежит в промежутке  $30^\circ - 69^\circ$ .

#### Литература

1. А.Н. Ремизов. Курс физики, электроники и кибернетики. М., "Высшая школа", 1982, с. 170-183.
2. Ю.А. Владимиров, Д.И. Рощупкин, А.Я. Потапенко, А.И. Деев. Биофизика. М., "Медицина", 1983, с. 173-186.

## С о д е р ж а н и е

1. Изучение цепи переменного тока.....	3
2. Ознакомление с индуктивным датчиком.....	24
3. Изучение импеданса живой ткани .....	29
4. Выпрямление переменного тока .....	41
5. Изучение статических характеристик транзистора.....	60
6. Изучение лампового усилителя.....	69
7. Изучение усилителя фонокардиографа.....	78
8. Изучение УВ4 - генератора .....	87
9. Источники импульсного тока.....	97
10. Ознакомление с принципами ЭКГ.....	120

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ДЛЯ МЕДИКОВ. II.  
Составитель Хильда Т е р а л ь.  
На русском языке.  
Тартуский государственный университет.  
ЭССР, 202400, г. Тарту, ул. Юликоолд, 18.  
Ответственный редактор У. Мельдер.  
Подписано к печати 31.08.1987.  
Формат 60x84/16.  
Бумага писчая.  
Машинопись. Ротапринт.  
Условно-печатных листов 7,91.  
Учетно-издательских листов 7,21. Печатных листов 8,5.  
Тираж 500.  
Зак. № 737.  
Цена 25 коп.  
Типография ТГУ, ЭССР, 202400, г. Тарту, ул. Тийги, 78.